Vanda Palubinskienė

Fizika

Vadovėlis XI–XII klasei

Suaugusiųjų ir savarankiškam mokymuisi

PIRMOJI KNYGA

ŠVIESA
METŲ

Vanda Palubinskienė

Fizika

Vadovėlis XI–XII klasei



Suaugusiųjų ir savarankiškam mokymuisi

PIRMOJI KNYGA



ŠVIESA KAUNAS

60 METŲ

UDK 53(075.3)
Pa156

Redaktorė ELVYRA ŽURAUSKIENĖ

Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministerijos rekomenduota 2005 04 11, Nr. 69

Vadovėlis atitinka kalbos taisyklingumo reikalavimus

Pirmasis leidimas 2005

Palubinskienė, Vanda

Pa156 Fizika: vadovėlis XI–XII klasei: suaugusiųjų ir savarankiškam mokymuisi: pirmoji knyga / Vanda Palubinskienė. – Kaunas: Šviesa, 2005. – 288 p.: iliustr.

Kn. taip pat: Klausimų ir užduočių atsakymai: p. 271–272. – Priedai: p. 273–287. – Bibliogr., p. 288.

ISBN 5-430-04042-8

Nors vadovėlis skirtas suaugusiųjų ir savarankiškam mokymuisi, jame pateikiama medžiaga visiškai atitinka bendrojo lavinimo vidurinės mokyklos fizikos programą.

Vadovėlyje išdėstytos trys pagrindinės fizikos kurso dalys: mechanika, šiluminiai reiškiniai ir elektrostatika. Visos dalys suskirstytos į smulkesnes dalis – skyrius, o šie – į paragrafus, kurių kiekvieno pabaigoje pateikiami praktiniai klausimai ir užduotys.

Knygos pabaigoje yra įvairūs priedai: pagrindinės sąvokos, konstantos ir jų išvestiniai dydžiai, fizikinių dydžių lentelės. Be to, pateikiami užduočių atsakymai.

Vadovėlyje dėstoma medžiaga sudaro galimybę mokytojui lanksčiau diferencijuoti ir pritaikyti žinias įvairaus amžiaus jaunimui, turinčiam skirtingus mokymosi gebėjimus ir nevienodą praktinės veiklos patirtį.

UDK 53(075.3)

ISBN 5-430-04042-8

TURINYS

ĮVADAS

MECHANIKA

6 skyrius. Skysčiai ir dujos

ŠILUMINIAI REIŠKINIAI

7 skyrius. Molekulinės kinetinės teorijos pagrindai

8 skyrius. Garų, skysčių ir kietųjų kūnų savybės

9 skyrius. Termodinamikos pagrindai

ELEKTRODINAMIKOS PAGRINDAI

10 skyrius. Elektrostatika

PRATARMĖ

Fizika, būdama viena iš pagrindinių mokslo šakų, padeda kurti visuomenę, pajėgiančią kūrybingai plėtoti krašto kultūros tradicijas, perimti modernią technologinę patirtį ir, taikant naujoves, išsaugoti dorines normas bei tautinę tapatybę. Fizika svarbi ne tik gamtai ir technikai pažinti – kartu ji teikia mokiniams daug praktinių įgūdžių, formuoja jų pasaulėjautą, gyvenimo prasmės paieškas, talkina siekiui įprasminti asmeninį gyvenimą. Todėl, rengdama šį vadovėlį, stengiausi jo turinį pateikti taip, kad būtų lavinamas besimokančiųjų kritinis mąstymas bei ugdoma mąstymo kultūra, vaizduotė, savarankiškumas, padedama plėtoti ir gilinti jau turimus praktinius įgūdžius, kartu ugdomas gebėjimas įgytas žinias pritaikyti praktikoje.

Rašydama šį vadovėlį, didžiausią dėmesį skyriau neakivaizdiniam bei savarankiškam mokymui bei mokymuisi. Kiekvienais metais daugėja besimokančiųjų neakivaizdiniu būdu. Tai: moterys, auginančios vaikus; asmenys, kurių darbas trunka daugiau kaip 12 h per dieną arba yra susijęs su ilgalaikėmis komandiruotėmis; privalomą tarnybą atliekantys jaunuoliai, galintys mokytis vos kelias valandas per savaitę; vidurinės mokyklos moksleiviai, kurie per mokslo metus keliems mėnesiams išvyksta gyventi į užsienį, o sugrįžę – pageidauja tęsti mokymąsi; moksleiviai, kurie derina darbinę veiklą su mokymusi ir pan. Manau, kad norinčiam mokytis jaunimui būtina sudaryti sąlygas žinioms įgyti bei gilinti kur nori, kaip nori ir kada nori. Šis leidinys kaip tik ir skiriamas savarankiškai besimokantiems, kartu jis bus naudingas visiems, besiruošiantiems fizikos egzaminui. O fizikos mokytojui šis vadovėlis galėtų būti viena iš papildomo mokymo priemonių.

Rengdama šį leidinį, stengiausi, kad jame pateikta teorinė medžiaga būtų grindžiama ne vien teorijomis ir formulėmis, bet ir praktiniu fizikos žinių taikymu. Jame supažindinama su fizikos mokslo plėtros istoriniais faktais nurodant fizikos raidos Lietuvoje prielaidas ir atskirų jos sričių laimėjimus bei numatomas perspektyvas. Nemažai dėmesio skiriama norint parodyti, kaip fizikos žinios taikomos buitiniame žmonių gyvenime kuriant naujas technologijas, sprendžiant kasdienio gyvenimo, aplinkos apsaugos bei šiuolaikinės fizikos tyrimų problemas.

Vadovėlis leidžiamas dviem knygomis. Pirmojoje, didesnės apimties, knygoje, iš pradžių aptarus metodologinius fizikos klausimus, gilinamasi į seniausiai žinomą jos sritį – mechaniką. Šioje dalyje nagrinėjamas kūnų judėjimas ir įvairių jėgų dėsniai, pateikiama mechaninio darbo, galios, energijos samprata. Aiškinama mechaninių svyravimų ir bangų esmė, skysčių ir dujų mechaninės savybės, nagrinėjami garso reiškiniai.

Antroji dalis skiriama šiluminių reiškinių analizei. Čia aiškinami molekulinės kinetinės teorijos pagrindai, nagrinėjamos garų, skysčių ir kietųjų kūnų savybės, pateikiami termodinamikos pagrindai aprašant grįžtamuosius ir negrįžtamuosius procesus gamtoje, entropiją.

Trečiojoje knygos dalyje gvildenamos elektrostatikos, elektromagnetizmo teorijos, aiškinama nuolatinės srovės esmė, įvairios savybės.

Antrojoje knygoje toliau dėstomi elektrodinamikos pagrindai: kintamoji elektros srovė, elektromagnetiniai virpesiai ir bangos, pateikiama radijo ryšio ir televizijos samprata. Atskirai aiškinama Einšteino reliatyvumo teorija. Daug dėmesio skiriama svarbiai fizikos sričiai – optikai. Aptarus spinduliavimo ir spektrinės analizės klausimus, pereinama prie šiuolaikiškiausios fizikos srities – kvantinės fizikos. Šioje dalyje dėstoma kvantinė, atomo, atomo branduolio fizika ir jos taikymas, atskleidžiama elementariųjų dalelių esmė.

Vadovėlis baigiamas fundamentalia astronomijos dalimi. Joje aprašoma Visatos sandara, aiškinama, kas yra žvaigždės, Saulė, ūkai ir kt., pateikiama galaktikos samprata, gvildenamos įdomios Visatos plėtimosi, antropinio principo teorijos.

Visos aptartos dalys suskirstytos į smulkesnes dalis – skyrius, o šie – į paragrafus, kurių kiekvieno pabaigoje pateikiami praktiniai klausimai ir užduotys.

Knygos pabaigoje yra įvairūs priedai: pagrindinės sąvokos, konstantos ir jų išvestiniai dydžiai, pagrindinių fizikinių dydžių lentelės. Be to, pateikiami užduočių atsakymai.

Vadovėlis parengtas pagal fizikos programą ir jį pasirinkusiems padės nuosekliai ir sistemingai mokytis fizikos, lavins raštingumą bei loginį mąstymą, skatins tolesnio mokymosi motyvaciją, formuos besimokančiųjų sampratą apie vieningą gamtos mokslų ryšį.

Autorė



ĮVADAS

1. Fizika, jos tyrimo objektas ir metodai

Nuoseklius fizikos ir kitų mokslų tyrimus III a. pr. Kr. pradėjo graikų mokslininkai, kurie keletą amžių būrėsi svarbiausiame kultūros ir mokslo centre Aleksandrijoje, prie jos muziejaus (mūzų šventovės) ir garsiosios bibliotekos. Susidarius puikiai kūrybinei atmosferai, buvo atlikta daug įstabių darbų, pavyzdžiui, Euklidas (*Euklides*) suformulavo šviesos spindulių sklidimo ir atspindžio dėsnius, Ktezibijus (*Ktesibius*) ir Heronas (*Heron*) sukūrė vandens laikrodį, eolipilą – garo turbinos pirmtaką ir kt. bei aprašė jų veikimą, Ptolemėjas (*Ptolemaios*) išplėtojo Aristotelio dangaus kūnų judėjimo teoriją, Archimedas (*Archimedes*), lankydavęsis Aleksandrijoje (nors gyveno Sirakūzuose), nustatė sverto taisyklę, pagrindinį kūnų plūduriavimo dėsnį, apskaičiavo įvairių kūnų masės centrus, o įžymusis graikų mokslininkas Aristotelis (384–322 m. pr. Kr.) pirmasis pavartojo žodį *fìzika* (gr. *physis* – gamta).

Aleksandrijos biblioteka sunyko miestą užėmus romėnams ir įsigalėjus krikščionybei, kuri ankstyvuoju laikotarpiu kovojo su senuoju mokslu kaip su pagoniškuoju. V a. po Kr. biblioteka buvo išgrobstyta, o jos likučiai galutinai sunaikinti. Mokslo, kartu ir fizikos, tyrimai ilgam užgeso. Norint kurti fiziką toliau, reikėjo, kad bendrasis mokslo lygis priartėtų prie grupelės genijų pasirinkto lygio, kad ne vienoje vietoje, o įvairiuose miestuose ir šalyse susidarytų mokslui palankios sąlygos, kad visuomenė suprastų ir skatintų mokslo atradimus. Tai įvyko negreitai, todėl tolesnė fizikos plėtotė nebuvo labai sklandi.

Romėnai iš graikų perėmė daugiausia praktinių žinių: originalių veikalų jie nerašė, tik sudarinėjo enciklopedijas. V a. barbarams užplūdus Romos imperiją, mokslo rankraščiai, kaip ir daugelis kultūrinių vertybių Europoje, buvo sunaikinti

ir pamiršti. Džiugu, kad kai kuriuos graikų mokslininkų veikalus išsaugojo arabai. Pasinaudoję arabų vertimais, XI–XII a. europiečiai iš naujo atrado Aristotelio ir kitų antikos mąstytojų raštus. Tuo laikotarpiu Italijoje, Anglijoje, Prancūzijoje kūrėsi universitetai, kuriuose buvo verčiami ir studijuojami graikų filosofų kūriniai. Viduramžių Europoje Aristotelio raštai padarė ypač didelį įspūdį, todėl juos skelbė kaip mokslo bibliją, o pats Aristotelis, kai jo mokymą teologai suderino su krikščioniška dogmatika, tapo didžiu autoritetu. Toks nekritiškas Aristotelio veikalų studijavimas ir komentavimas neskatino naujų mokslinių tyrinėjimų. Viduramžių laikotarpio fizika tapo knyginiu mokslu – *scholãstika*, atitrūkusia nuo praktikos, užsidariusia Aristotelio filosofinių idėjų rate. Buvusi geniali, Aristotelio sistema palaipsniui tapo mokslo stabdžiu. Plėtojantis amatams, tobulėjant technikai, karo mokslui, kaupėsi žinios, prieštaraujančios Aristotelio teiginiams. Visa tai skatino gamtos mokslų, ypač fizikos, atsiskyrimą nuo filosofijos.

Naujojo mokslo pranašai buvo genialusis XV a. išradėjas Leonardas da Vinčis (*Leonardo da Vinci*), filosofas Frensis Bekonas (*Bacon*), skelbęs, kad patirtis – vienintelis mūsų žinių šaltinis, heliocentrinės sistemos kūrėjas Mikalojus Kopernikas (*Kopernikus*).

Tikrasis šiuolaikinės fizikos pradininkas buvo italų mokslininkas Galileo Galilėjus (*Galilei*). Jis atsisakė ambicingo ir nevaisingo senojo mokslo tikslo iš karto ieškoti atsakymų į svarbiausius klausimus – kokia yra pasaulio sandara? kokios yra reiškinių priežastys? ir t. t., bet ėmė skelbti reiškinius, tirti jų dėsningumus ir daryti išvadas. To principo laikosi ir šiuolaikinė fizika. Šių dienų mokslininkai taiko Galilėjaus suformuluotą fizikos metodą, kurio esmė yra tokia:

- suformuluoti problemą;
- ištirti reiškinį, sumažinus jį iškreipiančių veiksnių įtaką;
- įžvelgti rezultatuose matematinius dėsningumus, suformuluoti hipotezę;
- nustatyti iš tų dėsningumų išplaukiančias išvadas ir patikrinti jas bandymais;
- jei hipotezė nepasitvirtina, vėl kartoti problemos sprendimo etapus ar dalį jų.

Galilėjus buvo puikus eksperimentuotojas ir stebėtojas. Mėtydamas rutulius iš pakrypusio Pizos bokšto, jis įrodė, kad smulkūs ir lengvi daiktai krinta vienodu greičiu (jei nepaisoma oro pasipriešinimo), o stebėdamas svyruoklės judėjimą, nustatė jos svyravimo dažnį. Gerai suvokdamas tikslių matavimų svarbą, Galilėjus sukonstravo ne vieną prietaisą: termometro pirmtaką – *termoskòpą*, jautrias svarstykles, pirmąjį skaičiavimo prietaisą – *proporcionãlą*, pasiūlė švytuoklinio laikrodžio idėją. Išgirdęs, jog kažkoks olandų meistras išrado didinamąjį vamzdį, Galilėjus per keletą dienų pats pasigamino tokį dviejų lęšių prietaisą – paprasčiausią *teleskòpą* ir naudodamasis juo atrado Mėnulio kalnus, Jupiterio palydovus, Saulės dėmes, nustatė, kad Paukščių Takas sudarytas iš daugelio žvaigždžių. Vėliau jis sukonstravo ir *mikroskòpą*.

XVII a. fizika tapo savarankišku mokslu. Prasidėjo elektrostatikos, optikos, akustikos tyrimai, nors tai buvo sparčios mechanikos plėtotės amžius.

XVIII ir XIX amžių sandūroje atsirado ir tobulėjo garo mašinos, buvo išrastas *termomètras*, *manomètras*, kaupiamos šiluminės fizikos žinios. Garo mašinos įsigalėjo gamyboje ir transporte. Per šį laikotarpį padaryta daug svarbių atradimų ir kitose fizikos mokslo šakose. Tad XIX a. – šiluminės fizikos amžius.

Faradėjui atradus elektromagnetinės indukcijos reiškinį, XIX a. pabaigoje ir XX a. pradžioje sparčiai plėtojosi elektrotechnika. Atsirado ir tobulėjo elektros mašinos, didėjo technikoje ir buityje suvartojamos elektros energijos kiekis. Šis laikotarpis į fizikos istoriją įėjo kaip elektros amžius.

XX a. fizikus sudomino atomų ir jų branduolių sandaros paslaptys. Mokslininkai pradėjo naudoti branduolinę energiją: 1946 m. sukurtas pirmasis pasaulyje branduolinis reaktorius (E. Fermis), 1945 m. JAV pagaminta ir išbandyta pirmoji pasaulyje atominė bomba, 1946 m. sukurtas pirmasis Europoje ir Azijoje branduolinis reaktorius (I. Kurčiatovas), 1953 m. buvusioje SSRS įvykdyta pirmoji termobranduolinė reakcija, 1954 m. paleista pirmoji pasaulyje atominė elektrinė, o 1957 m. pastatytas pirmasis pasaulyje atominis laivas. 1983 m. Lietuvoje ėmė veikti viena galingiausių tuo metu atominių elektrinių – Ignalinos atominė elektrinė; jos galia siekia 2,5 mln. kW. 1960 m. sukurtas pirmasis lazeris (T. Melmanas); 1975 m. paleistas naujos kartos termobranduolinis įrenginys „Tokamakas-10“. Taigi XX amžius dar vadinamas atomo amžiumi.

1957 m. buvusioje SSRS paleistas pirmas pasaulyje dirbtinis Žemės palydovas, o 1961 m. balandžio 12 d. Jurijus Gagarinas pirmą kartą apskriejo Žemės rutulį. 1969 m. JAV kosmonautai nusileido Mėnulyje (pirmasis jame išlipo amerikietis N. Armstrongas).

Skriejant kosminiais laivais, atliekami sudėtingi moksliniai tyrimai, laivai sujungiami, kuriamos naujos kosminės stotys. Tad mes gyvename kosmoso amžiuje.

Svarbiausios šių dienų fizikos raidos kryptys yra šios: gilinimasis į mikropasaulio struktūrą; valdomos termobranduolinės reakcijos (termobranduolinės energetikos) kūrimo klausimai ir Visatos tyrimai.

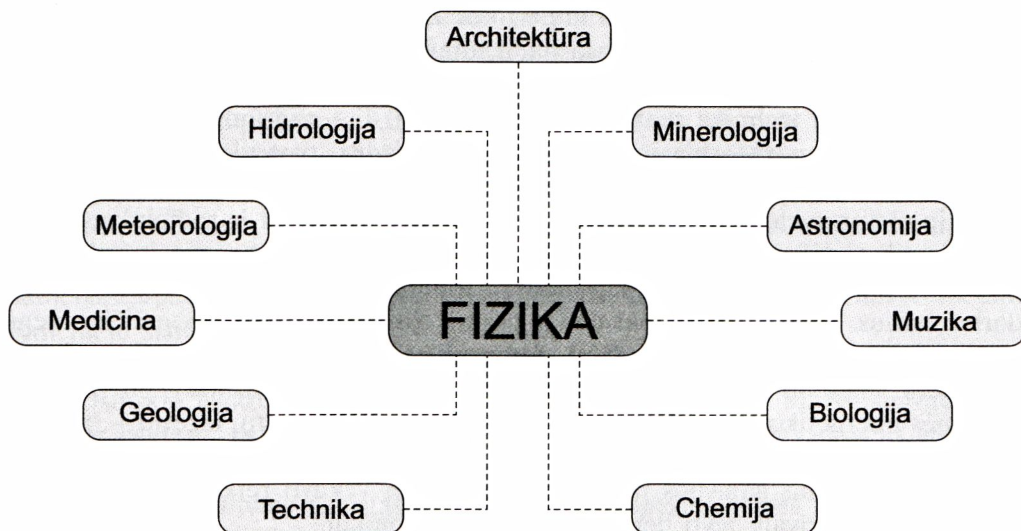
2. Fizikos ir kitų gamtos mokslų vieta moderniosios visuomenės gyvenime

Šiandien sunku pasakyti, kur baigiasi fizika ir kur prasideda kiti, naujieji, gamtos mokslai – *fìzinė chèmija, biofìzika, biònika, astrofìzika* ir t. t. Daugelis iš jų dar tik žengia pirmuosius žingsnius, aptikdami visai naujus iki šiol nežinomus gamtos reiškinius. Tai rodo, kad fizika glaudžiai siejasi su kitais gamtos mokslais ir dažnai yra raktas jų tiriamiems reiškiniams pažinti.

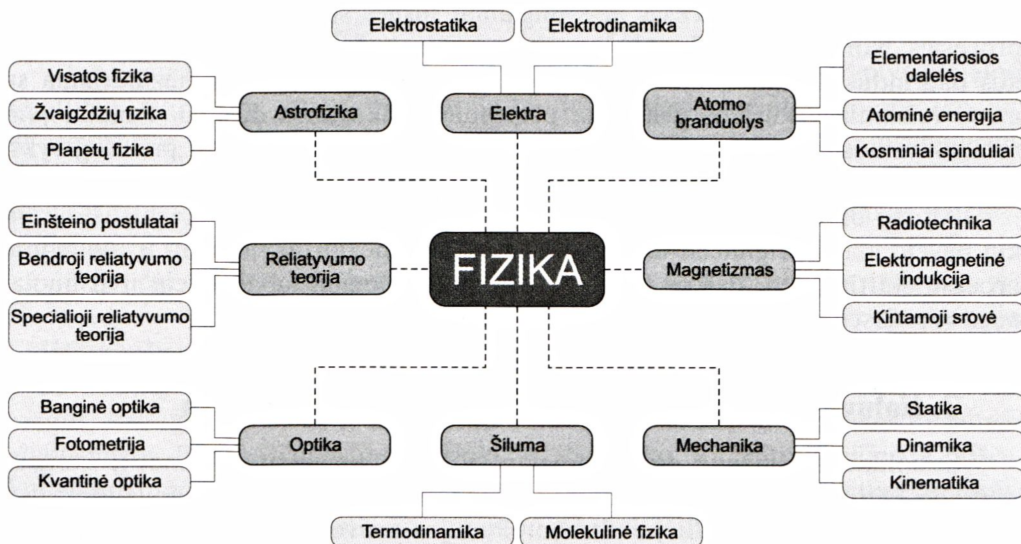
Fizika neatsiejama ir nuo praktikos. Akademiko S. Vavilovo žodžiais tariant, fizika atsirado iš praktikos ir yra skatinama praktinių poreikių.

Nors mokslas ir praktika yra glaudžiai susiję, tačiau jie turi bruožų, kurie griežtai skiria vieną nuo kito. Dž. Bernalas pateikia tokį pavyzdį. Jūrininkai žinojo, kaip reikia naudotis svertais, o pirkliai svarstyklėmis naudojosi daug amžių anksčiau, negu Archimedas nustatė formalų sverto dėsnį. Tačiau Archimedo atrastas

1 schema



2 schema



dėsnis sudarė sąlygas naujiems mechanikos išradimams, kurie praktikui niekuomet nebūtų šovę į galvą. Taigi žymūs pertvarkymai įvyksta tik padedant mokslui.

Fizikos ir technikos istorija akivaizdžiai rodo, kad žmogui reikalingų gėrybių gamybos būdai priklauso nuo turimų fizikos žinių. Pritaikant fizikos atradimus, atsiranda naujos technikos šakos, kuriami tobulesni įrenginiai, efektyvesni gamybos būdai.

Savo ruožtu technika skatina fizikos pažangą. Ji – pagrindinis fizikos „užsakovas". Tokio bendradarbiavimo rezultatai akivaizdūs, pavyzdžiui, M. Faradėjui nustačius elektromagnetinės indukcijos dėsnį, susikūrė tokia svarbi technikos šaka, kaip elektrotechnika. Šiandieninė radiotechnika, taip pat ir radiolokacija, egzistuoja tik todėl, kad fizikai atskleidė elektromagnetines bangas ir sukūrė jų savybes aiškinančius teorinius pagrindus. Atominė energetika yra taip pat fizikų darbo vaisius. Mokslo atradimai dabar praktikoje pritaikomi daug greičiau negu praėjusiame šimtmetyje. Pavyzdžiui, fotografijos idėja buvo įgyvendinta tik po 112 metų, telefono – po 56 metų, radijo – po 35 metų, televizijos – po 12 metų, atominės energetikos – po 6 metų, tranzistoriaus – po 5 metų, lazerio – praėjus vos 2 metams.

Šiuolaikiniams gamybos procesams suprasti ir vykdyti reikalingos fizikos žinios, todėl jas privalu įgyti bet kurio profilio technikui.

Su fizika glaudžiai siejasi tiek žemės ūkio mokslai, tiek ir medicina, architektūra, muzika, geologija bei kiti mokslai (žr. 1 schemą). Turime net naują fizikos šaką – agrofiziką, kuri nagrinėja fizikinių veiksnių įtaką augmenijai, jos mitybai ir augimui. Šviesa, šiluma, vanduo ir oras – tai pagrindiniai veiksniai, nuo kurių priklauso visas augalų gyvenimas.

Fizika, fizikiniai tyrimo metodai būtini ir šiuolaikinės biologijos mokslui. Kiekvienas biologinis procesas neišvengiamai susijęs su fizikiniais bei cheminiais procesais. Norint suprasti kraujo apytaką organizmuose, reikia žinoti hidrodinamikos pagrindus. Diagnozuojant tiek žmonių, tiek ir gyvulių ligas, susiduriama su garso reiškiniais, kuriuos paaiškina pagrindiniai akustikos dėsniai. Panaudojant radioaktyviuosius izotopus, pavyko nustatyti visą eilę biocheminių procesų, vykstančių gyvulių audiniuose.

Atomo branduolio spinduliavimas tyrinėtojų rankose tampa svarbiausiu įrankiu paveldimajai prigimčiai dirbtinai keisti. Taigi, nežiūrint fizikinių ir biologinių procesų skirtingumo, fizikos teikiama pagalba biologijai labai didelė ir ji nuolat auga (žr. 2 schemą).

3. Lietuvos mokslininkų vaidmuo fizikos mokslo raidoje

Šešioliktame amžiuje, prieš įsteigiant Vilniaus universitetą ir net jį įsteigus, nemažai Lietuvos didikų bei praturtėjusių miestiečių siuntė savo sūnus mokytis į Italijos universitetus. Galilėjui dirbant Padujos universitete, ten mokėsi kelios dešimtys jaunuolių iš Lietuvos Didžiosios Kunigaikštystės. Asmeniniuose Galilėjaus užrašuose minimi keli lietuviai, klausę jo privačiai skaitomų įžanginių kursų apie *fortifikācijas* (lot. *fortificatio* – įtvirtinimas; karo inžinerijos statinys, įtvirtini-

mas) ir proporcionalo naudojimą, o Jonas Lietuvis (Jonas Stanislovas Sapiega) giriamas kaip vienas iš labiausiai darančių pažangą moksle.

1579 m. įkurtas Vilniaus universitetas priklausė jėzuitų ordinui, ir jo profesoriai privalėjo laikytis nuostatų, draudusių dėstyti naujųjų laikų mokslą ir filosofiją. Tad beveik iki XVIII a. pabaigos fizika Vilniaus universitete buvo studijuojama kaip filosofijos kursas pagal Aristotelio sistemą. Jo raštai buvo nagrinėjami remiantis viduramžių filosofų komentarais, scholastinių disputų forma. Vis dėlto pažangesnieji dėstytojai – O. Krygeris, J. Rudamina-Dusetiškis, T. Žebrauskas ir kt. naujojo mokslo kritikos pretekstu supažindindavo ir su Koperniko, Galilėjaus, Dekarto pažiūromis, o kartais net atvirai simpatizuodavo joms. Apie 1630 m. Vilniaus universitetas įsigijo pirmąjį optinį vamzdį – teleskopą ir studentams būdavo demonstruojami Galilėjaus ir kitų astronomų atradimai, tiesa, juos interpretuojant Ptolemėjo sistemos dvasia.

Lietuvos mokyklose fizika pradėta dėstyti nuo 1573 m. 1777 m. išleistas J. H. Osinskio fizikos vadovėlis, o 1784 m. – pirmas oficialus M. Kubės vadovėlis „Fizikos įvadas“. 1811 m. pasirodė pirmasis S. Stubelevičiaus vadovėlis aukštajai mokyklai.

1823 m. Lietuvoje išleistas F. Dževinskio eksperimentinės fizikos vadovėlis, 1866 m. – K. Krajevičiaus fizikos vadovėlis. 1860 m. pasirodė pirmasis fizikos uždavinynas, o 1871 m. buvo paskelbtos pirmosios fizikos programos. Pirmąjį lietuvišką fizikos vadovėlį „Populiarišką rankvedį fizikos“ 1899 m. parašė P. Vileišis.

Dabartinių populiarių fizikos vadovėlių bei įvairių fizikos leidinių autoriai yra šie Lietuvos fizikai: P. Brazdžiūnas, B. Kukšas, S. Vičas, K. Baršauskas, K. Juška, J. Martišius, V. Pocius, J. Ūža, S. Jakutis, R. Karazija, V. Straižys, V. Čepinskis, A. Dargys, R. Čekenienė, V. Ambrasas, H. Horodničius, V. Valentinavičius, L. Klimka, J. Andriūnas ir kt.

Svarbiausios Lietuvos mokslų akademijoje vykdomų tyrimų kryptys yra šios: 1) atomų, molekulių, atomų branduolių teorinė ir eksperimentinė spektroskopija; 2) atmosferos užterštumo fizikinių – cheminių procesų ir jos valymo mechanizmų tyrimas; 3) galaktikos tyrimas daugiaspalvės fotometrijos būdu; 4) puslaidininkių fizika ir chemija; 5) prietaisų ir aparatūros kūrimas; 6) galvanotechnikos fizikinės ir cheminės problemos.

A. Jucio sukurta teorinė atomų ir molekulių spektroskopijos mokykla yra žinoma Lietuvoje ir užsienyje. Čia sukurta daugiaelektronių atomų ir jonų teorija, išplėtota reliatyvistinė atomo teorija. Pripažinimą pelnė V. Šugurovo, A. Bolotino, I. Levinsono, Z. Rudziko, S. Ališausko, G. Kamuntavičiaus, J. Kaniausko, R. Karazijos, P. Bagdonavičiaus ir kitų fizikų darbai. Plačiai žinomi Lietuvos kvantinės elektronikos, lazerių fizikos mokslininkų A. Piskarsko, R. Baltramiejūno, J. Viščako sukurti naujo tipo plačiai derinami pikosekundiniai ir femtosekundiniai parametriniai lazeriai, atrankinio žadinimo pikosekundinis spektrometras. A. Piskarsko darbai įvertinti valstybine premija. Vilniaus universitete veikia mokslinis lazerių tyrimo centras, kurio mokslininkų atlikti darbai žinomi ne tik Lietuvoje, bet ir užsienyje.

Kauno technologijos universiteto mokslinių tyrimų sektoriuje „Vibrotechnika“ sukurta per 3000 išradimų, kurių dalis užpatentuota užsienyje.

Prof. K. Baršausko Ultragarso probleminėje laboratorijoje tiriamos ultragarso sklidimo įvairiose medžiagose ypatybės, kuriami ultragarso prietaisai moksliniams tyrimams, neardančiai kontrolei, medicinos diagnostikai. Per keturiasdešimt metų sukurta daugiau nei 300 išradimų, du kartus pelnyti išradėjų prizai „Eurika“. Savo darbais ši laboratorija atstovavo Lietuvai aštuoniolikoje tarptautinių parodų, dalyvavo trisdešimt dviejose tarptautinėse konferencijose, atliko per 180 ūkiskaitinių darbų. Daugelio mokslininkų, kaip antai: K. Baršausko, V. Ilgūno, E. Jaronio, V. Domarko, R. Kažio, E. Pilecko, darbai įvertinti nacionalinėmis premijomis.

Gamybiniame susivienijime „Elektronika“ buvo kuriami nauji prietaisai, skirti technologiniams gamybos procesams automatizuoti.

Lietuvoje veikė svarbūs moksliniai susivienijimai: „Lazeris“, „Galvanoplastika“, „Sigma“, skaičiavimo kompleksas „Elbrusas“. 1987 m. Specialiajame skaičiavimo mašinų biure sukonstruotas vienas pirmųjų pasaulyje pramoninis skaičiavimo automatas „Rūta-701“, skaitantis rankraščius ir mašinėle spausdintus ženklus. 1980 m. Vilniaus skaičiavimo prietaisų gamykloje pagaminta pirmoji Lietuvoje lempinė skaitmeninė elektroninė skaičiavimo mašina „EV-80“.

Lietuvoje ir už jos ribų gerai žinoma P. Brazdžiūno, J. Poželos sukurta kietojo kūno plazmos ir puslaidininkių fizikos mokykla. Šia kryptimi daugiausia darbų atlikta Lietuvos MA Puslaidininkių institute ir Vilniaus universiteto Fizikos fakultete. Genialių fizikų V. Tolučio, A. Šileikos, A. Matulionio, J. Vaitkaus, E. Montrimo, R. Brazio, V. Bareikio, A. Matulio vardai plačiai žinomi ne vien Lietuvoje, bet ir toli už jos ribų.

Puslaidininkių moksliniai tyrimai vykdomi Puslaidininkių fizikos institute, Vilniaus universitete, Elektrografijos institute trimis kryptimis: puslaidininkių plonųjų sluoksnių savybių tyrimas ir praktinis jų taikymas; karštųjų elektronų puslaidininkiuose tyrimai elektriniuose ir magnetiniuose laukuose; plazminių reiškinių puslaidininkiuose tyrimai. Puslaidininkių fizikos institute, vadovaujant J. Poželai, fizikai tiria puslaidininkių elektrines savybes stipriuose laukuose, įmagnetintos puslaidininkių plazmos ir elektromagnetinių bangų sąveiką, elektronų energijos spektrus, kuria naujus puslaidininkinius prietaisus. Pagal ištirtus reiškinius sukurti naujo tipo superaukštojo dažnio galios krūvininkų koncentracijos matuokliai, magnetiniam laukui jautrūs elementai, slėgio davikliai, jonotronas, daugiakanalis optinis keitiklis, rentgenometras, defektrografas, fotoelementai. Lietuvoje pagaminti puslaidininkiniai prietaisai atitinka pasaulinius standartus, daugelis jų įvertinti prizais ir medaliais. Mokslininkams J. Viščakui, P. Brazdžiūnui, A. Reklaičiui paskirtos Lietuvos nacionalinės premijos.

1977 m. Lietuvos fizikai S. Ašmontas, K. Repšas, J. Požela atrado elektrovaros susidarymo ir elektros laidumo asimetrijos vienalyčiame izotropiniame puslaidininkyje reiškinį. Šis darbas pripažintas atradimu. Tai pirmas mokslinis atradimas Lietuvoje.

A. Šileikai vadovaujant, optikos ir molekulinės spektroskopijos metodais tiriama puslaidininkių, kuriuos veikia stiprus elektrinis laukas, kryptingas ar hidrostatinis slėgis, juostinė struktūra ir elektronų energijos spektrai.

V. Tolučiui vadovaujant, tiriama daugiasluoksnių plonųjų puslaidininkių sluoksnių panaudojimo mikroelektronikoje ir superaukštojo dažnio elektronikoje galimybės. Prof. R. Dagio, A. Matulio vadovaujami mokiniai plėtoja kietojo kūno teoriją.

Šiluminės fizikos problemos nagrinėjamos ir tiriamos Fizikinių techninių energetikos problemų institute Kaune. A. Žukausko vadovaujami mokslininkai tiria šilumos mainus bei jų dėsnius ir ugniai atsparių medžiagų savybes. Tyrimai atliekami įvairiems skysčiams ir aukštos temperatūros dujoms aptekant įvairius paviršius. Ugniai atsparios keramikos mechaninės savybės nustatomos plačiame temperatūros intervale.

A. Žukauskui vadovaujant, P. Daujotas ir V. Žiugžda ištyrė šilumos mainų ypatybes aukštos temperatūros srautams aptekant cilindrinius kūnus ir susidarančio pasienio sluoksnio savybes. 1973 m. paskelbti šių mokslinių tyrimų rezultatai buvo pripažinti moksliniu atradimu (antrasis atradimas Lietuvoje).

V. Daukniui vadovaujant, tiriama aukštos temperatūros dujų srauto veikiamų medžiagų erozija, jų struktūros kitimas, aiškinamos medžiagų irimo sąlygos ir priežastys.

Technikos ir energetikos pažangai, gamtos apsaugai svarbūs Lietuvos MA Fizikos ir Fizikinių techninių energetikos problemų institutuose vykdomi darbai pagal tarptautines programas „Žmogus ir biosfera“, „Gamtinės aplinkos monitoringo globalinė sistema“, „Planetų geofiziniai tyrimai“. Bendradarbiaujant su JAV ir Švedijos mokslininkais, tiriamos atmosferos priemaišos virš visos Baltijos jūros, atliekami debesų fizikos tyrimai. B. Styra sukūrė ir įsigilino į branduolinę meteorologiją, kaip atskirą atmosferos fizikos sritį, kuri tiria atmosferos radioaktyvumą.

Elektronikos tyrimai buvo vykdomi Vilniaus ir Kauno radijo matavimų institutuose, Kauno Radijo gamykloje, Kauno technologijos universitete. Mokslinius tyrimus radijo matavimų srityje vykdė D. Eidukas, R. Žilinskas ir kt., akustoelektronikos srityje – S. Rupkus, ultragarsinėje elektronikoje – mokslininkai, vadovaujami V. Domarko, mikroelektronikoje – mokslininkai, vadovaujami L. Pranevičiaus, V. Gaidelio.

1918 m. pirmąjį radijo ryšį trumposiomis bangomis Lietuvoje užmezgė B. Tolutis. 1926 m. birželio 12 d. Kaune (J. Jurskio dėka) pradėtos transliuoti reguliarios radijo laidos.

1963 m. Lietuvoje pagamintas pirmasis lietuviškas televizorius „TEMP-6“.

Lietuvos fizikai bei astronomai garsėja ne tik Lietuvoje, bet ir visame pasaulyje. Daugelio jų darbai įvertinti premijomis ir medaliais, o garsių mokslininkų J. Poželos, V. Straižio, S. A. Misiūno, A. Jucio, A. Žvirono, B. Styros, Z. Rudziko, K. Ragulskio, V. A. Valiukėno, A. P. Sakalo, A. Matulionio, R. Karazijos, V. Ilgūno, V. Domarko, V. Dienio, V. Vanago, S. Ašmonto, A. Bandzaičio, Z. Kupliausko, K. Makariūno, P. Pipinio, G. Tautvaišienės ir kt. mokslo darbai skelbiami Lietuvos ir užsienio spaudoje.

2003 m. rugsėjį visus mus nudžiugino spaudoje pasirodžiusi žinutė, kad, kol viso pasaulio mokslininkai suka galvas, kaip pažaboti itin pavojingo ūmaus kvėpavimo takų uždegimo SARS viruso plitimą, lietuviai pasiūlė efektyvią kovos su virusu priemonę. Fizikos instituto Aplinkos fizikos ir chemijos laboratorijos vedėjas, vyriausiasis mokslo darbuotojas Vidmantas Ulevičius su keliais pagalbininkais sukūrė metodą, kuris padeda nustatyti, ar atmosferoje yra šis mirtinas virusas. Iki šiol naudojami metodai yra nepatikimi, nes nustato tik didelę mikrobų koncentraciją, o tyrimai trunka ilgai. Nepatikima informacija sukelia gausybę papildomų rūpesčių. Mūsų šalies mokslininkams pavyko įveikti šias problemas. Jau svarstoma galimybė pradėti serijinę šio prietaiso gamybą. Šis išradimas galbūt yra vertas net Nobelio premijos. Patikimais mikrobų nustatymo metodais mokslininkas susidomėjo prieš dešimtmetį. Atlikdamas bandymus su aerozolių spektrometru, V. Ulevičius pastebėjo, jog į tokį spektrometrą įsiurbtą orą apšvietus lazerio spinduliu ir panaudojus tam tikrą kompiuterinę įrangą, galima nustatyti biologinius objektus, įvertinti jų koncentraciją ir gauti jų atvaizdą. Tyrimas užtrunka labai trumpai, o gauti rezultatai – tikslūs ir išsamūs. Anot V. Ulevičiaus, tyrimai su tikruoju SARS virusu kol kas neatlikti, nes tai yra per daug pavojinga ir rizikinga, tačiau mokslininkas kartu su Amerikos ir Suomijos mokslininkais bei Lietuvoje jau kuriamo Aerozolių technologijų centro specialistais tęsia naujojo prietaiso bandymus. Vėliau numatoma pradėti jų gamybą. V. Ulevičius neabejoja, kad įrenginiai bus gaminami Lietuvoje, o partneriai iš užsienio šalių užsiims rinkodara. Mokslininkas mano, kad jo sukurtas įrenginys puikiai tinka ne tik kovai su SARS virusu, bet jis pravers ir maisto pramonės įmonėms, kuriose turi būti itin sterili aplinka.

4. Fizikinių dydžių matavimo vienetai

Fizikos dėsniai dažniausiai išreiškiami formulėmis, kurios rodo ryšį tarp skaitinių fizikinių dydžių verčių. Skaitinės dydžių vertės randamos juos matuojant, t. y. lyginant su pasirinktais matavimo vienetais, pvz., matuodami ilgį, nustatome, kiek kartų matuojamame atstume telpa ilgio vienetas, ir gautąjį skaičių vadiname ilgio skaitine verte. Įvairių fizikinių dydžių vienetus galima pasirinkti laisvai. Tačiau, norint skaičiuoti pagal fizikos formules, dydžių matavimo vienetus būtina tarpusavyje suderinti. Tam yra sudarytos matavimo vienetų sistemos. Kiekvienoje sistemoje kelių fizikinių dydžių matavimo vienetai yra laisvai parinkti. *Šie dydžiai ir jų matavimo vienetai vadinami pagrindìniais*. Visų kitų dydžių matavimo vienetai yra išvesti iš pagrindinių naudojant formules, kurios susieja fizikinius dydžius, ir vadinami *išvestìniais*.

Mokydamiesi fizikos, naudojamės universalia *tarptautinė víenetų sistemà*, sutrumpintai žymima SI (*System International*).

Pagrindiniai SI sistemos dydžiai yra **il̃gis**, **mãsė**, **laĩkas**, **elèktros srovė̃s stìpris**, **termodinãminė temperatūrà**, **šviesõs stìpris** ir **mẽdžiagos kiẽkis**, o juos atitinkantys pagrindiniai matavimo vienetai – *mètras*, *kilogrãmas*, *sekùndė*, *ampèras*, *kèlvi-*

nas, *kandelà* ir *mòlis*. Papildomi yra **plókščiojo** ir **erdv̀inio kam̃po** vienetai *radiãnas* ir *steradiãnas*.

Mètras (m) – tai atstumas, kurį šviesa vakuume nusklinda per $\frac{1}{299\,792\,458}$ sekundės dalį.

Kilogrãmas (kg) – masės vienetas, lygus tarptautinio etalono masei.

Sekùndė (s) yra cezio ($^{133}_{55}Cs$) atomo spinduliavimo, kurį sukelia elektrono kvantinis šuolis tarp to atomo pagrindinio būvio hipersmulkiosios struktūros lygių, 9 192 631 770,0 periodų trukmė.

Ampèras (A) yra stipris tokios nuolatinės elektros srovės, kuri, tekėdama dviem vakuume esančiais be galo ilgais ir nykstamai mažo skerspjūvio laidais, nutolusiais vienas nuo kito 1 m atstumu, sukelia tarp šių laidų sąveikos jėgą, lygią $2 \cdot 10^{-7}$ N kiekvienam laidų ilgio metrui.

Kandelà (cd) – tai toks šviesos stipris, kurį spinduliuoja statmena kryptimi $\frac{1}{600\,000}$ m^2 ploto absoliučiai juodas paviršius, kai jo temperatūra lygi platinos kietėjimo temperatūrai, o slėgis lygus $1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa.

Kèlvinas (K) – vandens trigubojo taško temperatūros $\frac{1}{273{,}16}$ dalis.

Mòlis (mol) – tai medžiagos, sudarytos iš $6{,}02 \cdot 10^{23}$ dalelių, kiekis.

Radiãnas (rad) – plokščiojo kampo vienetas, lygus kampui tarp dviejų skritulio spindulių, iškertančių apskritime tokį lanką, kurio ilgis lygus spinduliui. Išreiškus laipsniais, 1 rad = 57°1744,8''.

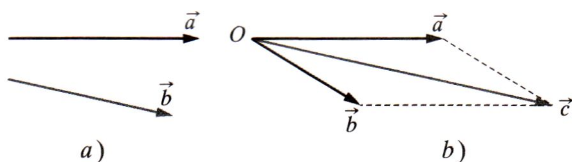
Steradiãnas (sr) – erdvinio kampo vienetas, lygus tokiam erdviniam kampui, kurio viršūnė yra sferos centre ir kuris iškerta sferos paviršiuje plotą, lygų sferos spindulio kvadratui.

Naudojantis šiais pagrindiniais vienetais, sudaromi visi kiti išvestiniai vienetai.

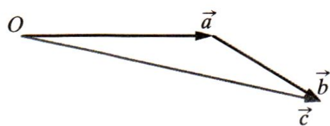
5. Skaliariniai ir vektoriniai dydžiai

Fizikinius dydžius galima suskirstyti į dvi grupes: *skaliãrinius* ir *vektoriniùs*. **Skaliãriniais dydžiais, arba skaliãrais, vadinami tokie dydžiai, kurie apibūdinami tik skaitine verte**, pavyzdžiui, laikas, masė, temperatūra. Tuo tarpu, norint apibūdinti kitus fizikinius dydžius, kaip antai: greitį, pagreitį, jėgą, be skaitinės vertės, dar būtina nurodyti ir jų kryptį erdvėje. **Vektor̀iniais dỹdžiais vadinami tokie fiziniai dydžiai, kurie apibūdinami ne vien didumu, bet ir kryptimi.** Grafiškai vektoriai vaizduojami tiesės atkarpomis su rodyklėmis. Atkarpos ilgis imamas proporcingas vektoriaus skaitinei vertei, o kryptis – lygiagreti jo krypčiai. Vektoriai žymimi pusjuodžiu šriftu (pvz., ***v***, ***F***, ***a***, ***M***) arba, kaip šiame vadovėlyje, rodyklėle virš raidės (pvz., $\vec{v}, \vec{F}, \vec{a}, \vec{M}$).

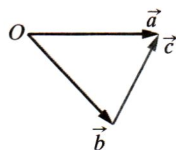
Matematiniai veiksmai su vektoriniais dydžiais atliekami kitaip negu su skaliariniais dydžiais. Du vektoriai sudedami naudojantis lygiagretainio arba trikampio taisyklėmis. Tarkime, reikia sudėti vektorius $\vec{a}$ ir $\vec{b}$ (1 pav., *a*).



1 pav.



2 pav.



3 pav.

Tuo tikslu vektorių $\vec{b}$, nekeisdami jo krypties ir didumo, perkelkime į vektoriaus $\vec{a}$ pradžios tašką (O). Laikydami, kad šie du vektoriai yra dvi lygiagretainio kraštinės, brėžkime priešingas kraštines. Gauto lygiagretainio įstrižainė atitiks šių dviejų vektorių sumą: $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ (1 pav., b). Tą patį rezultatą galime gauti ir kitu būdu. Nekeisdami vektoriaus $\vec{b}$ krypties, atidėkime jį nuo vektoriaus $\vec{a}$ galo (2 pav.). Suma bus vektorius $\vec{c}$, jungiantis pirmojo vektoriaus pradžią su antrojo vektoriaus galu.

Atvirkščias sudėčiai veiksmas yra vektorių atimtis. Iš vektoriaus $\vec{a}$ atimdami vektorių $\vec{b}$, pastarąjį, nekeisdami jo krypties, perkelkime į vektoriaus $\vec{a}$ pradžios tašką (3 pav.).

Vektorių $\vec{a}$ ir $\vec{b}$ skirtumas bus vektorius, einantis nuo vektoriaus $\vec{b}$ galo į vektoriaus $\vec{a}$ galą: $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$. Jeigu iš vektoriaus $\vec{b}$ atimsime vektorių $\vec{a}$, jų skirtumas bus vektorius $-\vec{c}$, kurio kryptis priešinga vektoriaus $\vec{c}$ krypčiai.

Daugindami vektorių $\vec{A}$ iš teigiamojo skaliarinio dydžio m, gausime vektorių $m\vec{A}$, kurio skaitinė vertė lygi mA, o kryptis sutampa su vektoriaus $\vec{A}$ kryptimi.

Vektoriaus $\vec{A}$ dalyba iš skaliarinio dydžio n ekvivalentiška jo daugybai iš dydžio $\frac{1}{n}$.

Klausimai ir užduotys

1. Iki kurio amžiaus Vilniaus universitete buvo dėstoma scholastinė fizika? Kodėl, nežiūrint Galilėjaus ryšių su Vilniumi, Vilniaus universiteto profesoriai taip negreitai pripažino jo rezultatus?

2. Kuo įžymūs fizikų Aristotelio ir Galilėjaus darbai? Kuo skiriasi jų mokymo idėjos?

3. Kodėl fizika yra technikos pagrindas? Kokią įtaką fizikos laimėjimams daro technikos plėtra?

4. Nurodykite pavyzdžių, kur fizikos dėsniais remiamasi biologijoje, medicinoje ir kituose moksluose.

5. Kuo fizikiniai reiškiniai skiriasi nuo cheminių reiškinių? Pateikite jų pavyzdžių.

6. Parenkite referatą: a) „Renesansas mene ir moksle“ (remkitės Leonardo da Vinčio, Mikelandželo, Koperniko, Galilėjaus pavyzdžiais); b) „Mokslininko kova už savo pažiūras“; c) „G. Galilėjus ir Lietuva“.

MECHANIKA

1 SKYRIUS. KINEMATIKOS PAGRINDAI

6. Mechaninis judėjimas. Pagrindiniai terminai, apibūdinantys judėjimą

Fizikos mokslas nagrinėja paprasčiausias ir bendriausias materijos judėjimo formas, kurios gali sudaryti labai sudėtingus gamtos ir technikos reiškinių kompleksus. Skiriamos keturios paprasčiausios judėjimo formos. *Mechãninis judė́jimas* – tai kūnų pasislinkimas vienas kito atžvilgiu arba kūnų deformacija. Šis judėjimas skirstomas į slenkamąjį, sukamąjį, svyruojamąjį judėjimus ir bangas. Visų rūšių mechaninis judėjimas yra tvarkingo pobūdžio, t. y. daugybė medžiagos dalelių juda vienodai. *Molekulìnis judė́jimas* – tai netvarkingas šiluminis atomų, molekulių ir jonų judėjimas, lemiantis agregatinę medžiagos būseną. Dar viena judėjimo forma yra susijusi su *elektrinio* ir *magnetinio laukų pasikeitimais* ir *apima* visus *elektromagnetinius reiškinius*. *Vidinis judėjimas atomuose* lemia optines medžiagų savybes, chemines kūnų savybes ir reiškinius, susijusius su branduoline energetika.

Kadangi mechaninis judėjimas yra paprasčiausia materijos judėjimo forma, tai pirmiausia iš visų gamtos mokslų atsirado ir imtas plėtoti mechanikos mokslas. Tačiau moksliškai mechanikos dėsniai buvo suformuluoti palyginti neseniai: pagrindinius jos dėsnius nustatė G. Galilėjus (1564–1642), K. Heigensas (1629–1695), o galutinai suformulavo I. Niutonas (1642–1727). Galilėjaus–Niutono mechanika, vadinama klasikine mechanika, sukurta stebint ir tiriant makroskopinius kūnus, judančius nedideliais greičiais lyginant su šviesos greičiu.

Mechanika skirstoma į materialiųjų taškų mechaniką ir ištisinių aplinkų mechaniką (tamprumo teoriją, hidrodinamiką, aerodinamiką). Kiekvieną iš šių mechanikos dalių sudaro trys skyriai: kinemãtika, dinãmika ir stãtika. **Kinemãtika nagrinėja kūnų judėjimą nepriklausomai nuo šį judėjimą sukeliančių priežasčių (jos pagrindus sukūrė Galilėjus ir Heigensas); dinãmika nagrinėja judėjimą, atsižvelgdama į jį sukeliančias priežastis, t. y. į veikiančias jėgas ir kūnų masę (jos pagrindą sudaro I. Niutono nustatyti dėsniai); stãtika apibūdina kūnų pusiausvyros sąlygas.**

Mechanikos mokslas turi didžiulę praktinę reikšmę. Juo remiantis, sprendžiami pagrindiniai technikos klausimai, tobulinamos gamybos priemonės, plečiama gamybos procesų mechanizacija bei automatizacija.

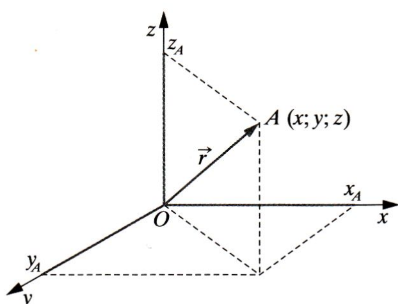
Mechãniniu judė́jimu vadiname kūno padėties kitimą kitų kūnų atžvilgiu laikui bėgant. Taigi judėjimas yra reliatyvus. **Kūną, kurio matmenų pasirinktomis judėjimo sąlygomis galima nepaisyti, vadiname materialiúoju taškù. Kūnas, kurio atžvilgiu nagrinėjamas kitų kūnų judėjimas, vadinamas atskaitõs kū́nu. Koordinačių sistema, išvesta per atskaitos kūną, ir prietaisas laikui matuoti sudaro atskaitõs sistèmą.** Paprasčiausia yra stačiakampė Dekarto koordinačių sistema (4 pav.).

Joje kūno padėtį, kai nekreipiamas dėmesys į kūno matmenis ir formą, galima nagrinėti kaip materialiojo taško A padėtį. Šią padėtį apibūdina koordinatės x_A, y_A, z_A arba spindulys vektorius $\vec{r}$, išvestas iš sistemos pradžios taško O į tašką A.

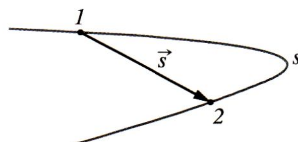
Linija, kurią brėžia vektoriaus $\vec{r}$ galas erdvėje, vadinama trajektòrija. Pagal trajektorijos formą mechaninis judėjimas skirstomas į *tiesiaeĩgį* ir *kreivaeĩgį judė́jimą*. Plokštumoje judančio kūno (pvz., kampu į horizontą mesto kūno) padėtį nusako dvi koordinatės, o tiese judančio – viena koordinatė. Bet kurio kūno judėjimui nagrinėti visada pasirenkama konkreti atskaitos sistema.

Mechaniniam judėjimui apibūdinti vartojami *kẽlio*, *póslinkio*, *greĩčio* ir *pãgreičio* terminai.

Kẽlias skaitine verte lygus materialiojo taško spindulio vektoriaus nubrėžtos trajektorijos ilgiui (5 pav. s). **Póslinkis – tai kryptinė tiesės atkarpa, jungianti kūno judėjimo pradžios ir pabaigos taškus** (5 pav. $\vec{s}$).

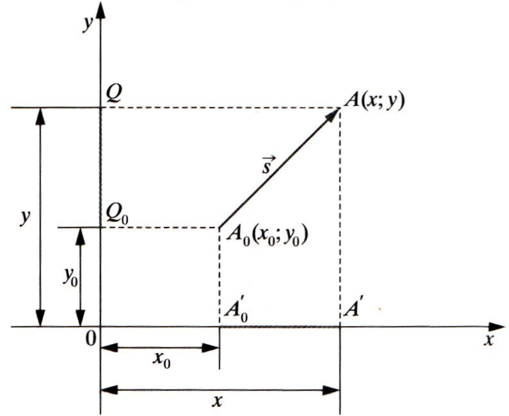


4 pav.



5 pav.

Kūnas juda plokštuma. Jo poslinkis $\vec{s} = \overline{A_0 A}$ (6 pav.), koordinačių ašys x ir y bei atskaitos pradžia parenkami taip, kad vektorius $\vec{s}$ būtų plokštumoje xOy. Vektoriaus $\vec{s}$ projekcija x ašyje yra atkarpa, $A_0^1 A_1^1$ $\left(s_x = A_0^1 A_1^1\right)$. Atkarpos ilgis arba skaitinė projekcijos vertė yra lygi $(x - x_0)$, t. y. pasislinkusio kūno koordinatės pokyčiui $(x - x_0 = \Delta x)$. Vektoriaus s projekcija y ašyje yra atkarpa Q_0Q, kurios ilgis lygus $(y - y_0)$, t. y. kūno koordinatės y pokyčiui $(y - y_0 = \Delta y)$. Taigi



6 pav.

$$s_x = x - x_0; \qquad s_y = y - y_0. \tag{1}$$

Poslinkio vektoriaus $\vec{s}$ projekcijos koordinačių ašyse x ir y lygios kūno koordinačių Δx ir Δy pokyčiams.

Iš to išplaukia, kad, žinant poslinkio vektorių (taigi ir jo projekcijas koordinačių ašyse), galima apskaičiuoti kūno koordinates: $x = x_0 + s_x$, $y = y_0 + s_y$; čia x_0 ir y_0 – pradinės kūno padėties erdvėje koordinatės, o x ir y – galinės kūno padėties erdvėje koordinatės. Iš paveikslo matome, kad, žinant poslinkio projekcijas koordinačių ašyse, galima rasti poslinkio modulį:

$$|s| = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}. \tag{2}$$

Materialiojo taško poslinkio modulis negali būti didesnis už kelio ilgį, t. y. $|s| \leq s$.

Klausimai ir užduotys

1. Kokiu atveju kūną galima laikyti materialiuoju tašku? Kodėl įvesta ši sąvoka?

2. Pagal kokius požymius klasifikuojamas mechaninis judėjimas?

3. Vienas automobilis važiuoja 60 km/h greičiu į vakarus, o kitas – 60 km/h greičiu į pietus. Ar vienodi automobilių greičiai?

4. Automobilio rodmuo per dieną padidėjo 150 km. Kas tai – kelias ar poslinkis?

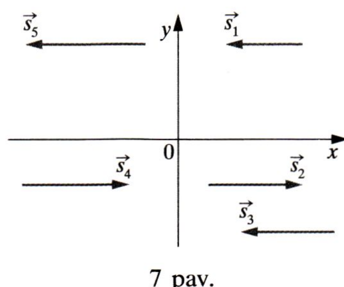
5. Temperatūra būna teigiama ir neigiama. Tad kodėl ji laikoma skaliariniu dydžiu?

6. Kelias iš Vilniaus į Alytų traukiniu per Kaišiadoris, Kauną, Kazlų Rūdą, Marijampolę, Kalvariją, Krosną ir Simną lygus 237 km, o važiuojant autobusu pro Trakus, Aukštadvarį, Jiezną ir Punią – 106 km. Apskaičiuokite poslinkį tarp Vilniaus ir Alytaus, jei skrendama tiesiai malūnsparniu. Užduotį atlikite grafiškai (mastelis 1 cm – 20 km).

7. Iš pradžių balionas pakilo į 300 m aukštį, paskui sustiprėjęs vėjas jį nunešė 100 m rytų kryptimi. Apskaičiuokite baliono nueitą kelią ir poslinkį.

8. Laivas nuplaukė šiaurės kryptimi 3 km, paskui, pasisukęs į šiaurės rytus, – dar 2 km. Grafiškai nustatykite laivo poslinkį bei jo kryptį.

7. Tiesiaeigis tolyginis judėjimas. Greitis



7 pav.

Tiesiaeigiù judéjimu vadiname tokį materialiojo taško (kūno) judėjimą, kurio trajektorija yra tiesi linija. Šitaip juda automobilis kelio ruožu, kuriame nėra įkalnių, nuokalnių, posūkių. Šią mechaninio judėjimo rūšį galime apibūdinti ir taip: **tiesiai ir tolygiai judančio materialiojo taško (kūno) poslinkiai per vienodus laiko tarpus yra lygūs.**

Iš pradžių kūno judėjimą nagrinėsime koordinačių ašies *Ox*, kuria kūnas juda, atžvilgiu. Taip pasirinkus ašį, poslinkio vektorius gali būti nukreiptas į tą pačią pusę kaip ir ašis arba – į jai priešingą pusę (7 pav.).

Pažvelgę į paveiksle pavaizduotus poslinkio vektorius, matome, kad vektoriaus $\vec{s}_2$ projekcija yra teigiama ir lygi vektoriaus moduliui: $s_{2x} = |s_2|$, o poslinkio vektoriaus $\vec{s}_3$ projekcija – neigiama: $s_{3x} = -|s_3|$.

Tarkime, kad kūno poslinkis per laiko tarpą Δt lygus $\vec{s}$. Santykis $\frac{\vec{s}}{\Delta t}$ parodo kūno poslinkio kitimo spartą ir vadinamas kūno *judėjimo greičiù*. Jis žymimas raide $\vec{v}$:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{\Delta t}. \tag{3}$$

Tiesiaeĩgio tolýginio judéjimo greičiù vadiname pastovų dydį, lygų kūno poslinkio per bet kurį laiko tarpą ir to laiko tarpo didumo santykiui. Remiantis 3 formule, galima nustatyti greičio matavimo vienetą, kuris tarptautinėje vienetų sistemoje (SI) išreiškiamas metrais per sekundę: $[v] = \frac{1\,\text{m}}{1\,\text{s}} = 1\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

1 m/s – tai toks judančio kūno greitis, kai per 1 s kūnas (arba materialusis taškas) pasislenka 1 m.

Žinant greitį, galima rasti poslinkį per bet kurį laiko tarpą Δt:

$$s = v\Delta t. \tag{4}$$

Kūnui judant, greičio vektoriaus kryptis sutampa su poslinkio kryptimi ir to kūno judėjimo kryptimi.

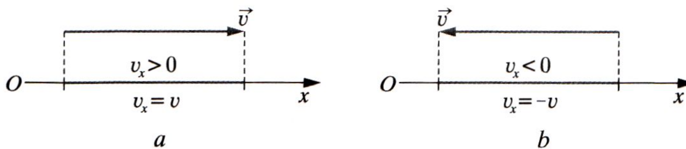
Apskaičiuojant poslinkį ir greitį, taikomos formulės, kuriose yra ne vektoriai, o jų projekcijos koordinačių ašyje (arba ašyse). Vektorių projekcijos – skaliariniai dydžiai, todėl su jomis atliekame algebrinius veiksmus. Kadangi vektoriai $\vec{s}$ ir $\vec{v}\Delta t$ lygūs, tai lygios ir jų projekcijos x ašyje. Todėl 4 formulės skaliarinė išraiška tokia: $s_x = v_x t$. Remdamiesi 1 formule, judančio kūno galinės taško padėties koordinatę x bet kuriuo laiko momentu t užrašome šitaip: $x - x_0 = v_x t$ arba

$$x = x_0 + v_x t. \tag{5}$$

Remiantis pastarąja formule, galima nustatyti kūno, judančio pastoviu greičiu, padėtį erdvėje bet kuriuo laiko momentu. Pagal šią formulę galima apskaičiuoti kūno greičio projekciją v_x, kai žinoma poslinkio projekcija s_x:

$$v_x = \frac{x - x_0}{t}. \quad (6)$$

Iš 6 formulės nustatoma greičio, kaip fizikinio dydžio, prasmė: greičio projekcija koordinačių ašyje lygi koordinatės pokyčiui per laiko vienetą. Vadinasi, *greitis parodo, kaip sparčiai kinta judančio kūno koordinatės.* 8 paveiksle pavaizduota greičio projekcija v_x, kuri gali būti tiek teigiama (*a*), tiek neigiama (*b*), todėl, nustatant kūno padėtį bet kuriuo momentu, būtina žinoti greičio vektorių arba jo projekcijas.



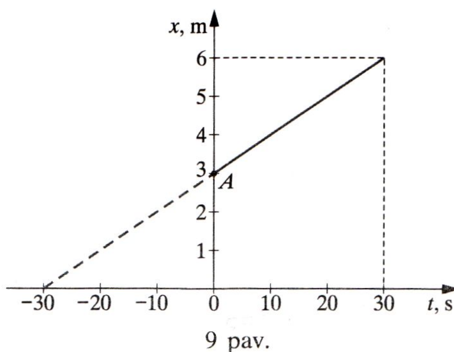
8 pav.

Automobiliuose įtaisyti spidometrai rodo tik greičio modulį, todėl iš jų parodymų negalime sužinoti nei automobilio judėjimo krypties, nei jo padėties bet kuriuo laiko momentu.

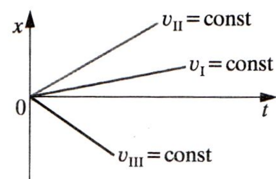
Abscisių ašyje atidėję laiką, o ordinačių ašyje – kūno koordinates (9 pav.), gausime kūno koordinatės priklausomybės nuo laiko grafiką. Ši tiesė vadinama *judėjimo grãfiku*. Pratęsę grafiką punktyrine linija (9 pav.) priešinga laiko ašiai kryptimi, sužinome, kad kūnas, esantis taške *A*, prieš 30 s buvo koordinačių pradžioje ($x = 0$).

Iš judėjimo grafikų sprendžiame ne tik apie kūno koordinatę, bet ir apie jo greitį bei poslinkį. Juo statesnis grafikas, t. y. juo didesnis kampas tarp jo ir laiko ašies, tuo didesniu greičiu kūnas judėjo. 10 paveiksle pavaizduoti trijų kūnų judėjimo grafikai. Matome, kad $v_{II} > v_I$, o III kūnas juda priešinga x ašiai kryptimi.

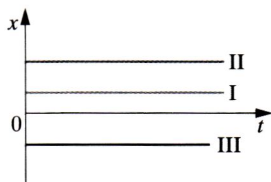
Be judėjimo grafikų, dažnai braižomi greičio grafikai. Jie gaunami ordinačių ašyje atidėjus kūno greičio projekciją, o abscisių ašyje – laiką. Iš tokių grafikų galima spręsti apie greičio kitimą laikui bėgant.



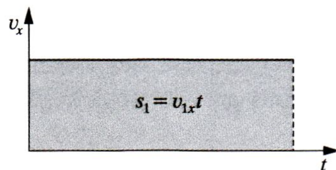
9 pav.



10 pav.



11 pav.



12 pav.

Tiesiai ir tolygiai judančio kūno greitis laikui bėgant nekinta. Todėl greičio grafikas – tiesė, lygiagreti su laiko ašimi (11 pav.). I ir II kūno grafikai vaizduoja jų judėjimą teigiamąja x ašies kryptimi, o III grafikas atitinka kūną, judantį priešinga kryptimi. Iš greičio grafiko galima sužinoti kūno poslinkį per pasirinktą laiko tarpą. Poslinkio dydis lygus stačiakampio plotui s_1 (12 pav.).

Klausimai ir užduotys

1. Bambukas auga 0,001 cm/s greičiu. Kiek jis užaugs per dvi paras?

2. Tarkime, nustatote savo laikrodį pagal laiko signalą, perduodamą per radiją. Kiek „vėluos“ jūsų laikrodis dėl baigtinio šviesos greičio, jei siųstuvo antena yra už 50 km? Ar pastebėsite paklaidą?

3. Dviratininkas tiesiu keliu iš vakarų į rytus pravažiavo pro stebėtoją 14 km/h greičiu. Kur buvo dviratininkas prieš dvi valandas? Kur jis bus po 1,5 h? Dviratininko buvimo vietą nurodykite stebėtojo atžvilgiu.

4. Kūnų judėjimą apibūdina lygtys $x_1 = 8t$ ir $x_2 = 60 - 6t$. Nubraižykite priklausomybės $x = x(t)$ grafikus. Nustatykite kūnų susitikimo vietą ir laiką.

5. Nubraižykite 3 m/s greičiu tolygiai kylančio lifto nueito kelio grafiką. Iš jo raskite, per kiek laiko liftas pakils į 70 m aukštį.

8. Judėjimo reliatyvumas

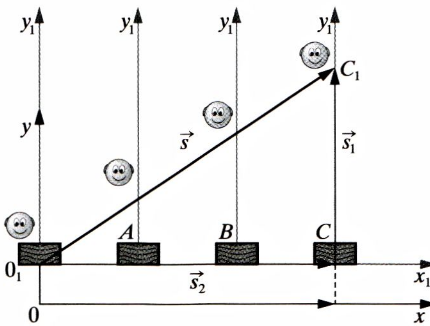
Judėjimo reliatyvùmui paaiškinti nagrinėsime to paties kūno judėjimą dviejų atskaitos sistemų atžvilgiu. Viena atskaitos sistema yra nejudanti, o kita – juda tolygiai ir tiesiai pirmosios atžvilgiu. Išnagrinėkime pavyzdį. Valtis plaukia per upę statmenai tėkmei tam tikru greičiu vandens atžvilgiu. Kranto atžvilgiu vanduo teka upės tekėjimo greičiu.

Valties judėjimą stebi du žmonės: vienas jų stovi ant kranto taške O (13 pav.), kitas – ant plausto (O_1), plaukiančio pasroviui (upės tekėjimo greičiu). Abu stebėtojai matuoja valties poslinkį ir judėjimo laiką. Plaustas vandens atžvilgiu plaukia upės tėkmės greičiu. Per tašką O išvedame nejudančią koordinačių sistemą xOy (x ašį nukreipiame išilgai kranto, y ašį – statmenai upės tėkmei). Kitą koordinačių sistemą, susietą su plaustu, išvedame per tašką O_1 – $x_1O_1y_1$. Tai judančioji atskaitos sistema. Ant plausto stovintis stebėtojas, plaukdamas pasroviui, mato, jog valtis tolsta nuo jo į kitą krantą visą laiką statmenai tėkmei. Jis tai mato ir taške A,

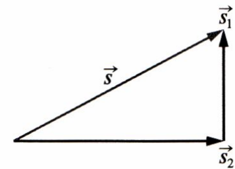
ir taške B, ir bet kuriame kitame taške. Kai po tam tikro laiko t plaustas atsiduria taške C, valtis pasiekia kitą krantą taške C_1. Judančios atskaitos sistemos (plausto) atžvilgiu valties poslinkis $\vec{s}_1 = \overrightarrow{CC_1}$. Padalijęs jį iš laiko t, judantysis stebėtojas gaus valties greitį $\vec{v}_1$ plausto (upės tėkmės) atžvilgiu: $\vec{v}_1 = \frac{\vec{s}_1}{t}$.

Ant kranto stovinčiam stebėtojui valties judėjimas yra kitoks. Stebėtojui „savo" sistemos atžvilgiu valties poslinkis per laiką t lygus $\vec{s} = \overrightarrow{O_1C_1}$. Drauge su plaustu judančios atskaitos sistemos poslinkis lygus $\vec{s}_2$ (sakoma, kad valtį „nunešė" pasroviui). Valties poslinkio schema pavaizduota 14 paveiksle. Iš 13 ir 14 paveikslų matyti, kad valties poslinkis $\vec{s}$ nejudančios atskaitos sistemos atžvilgiu apskaičiuojamas taip:

$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2. \tag{7}$$



13 pav.



14 pav.

Padaliję poslinkį iš laiko t, sužinosime valties greitį nejudančios atskaitos sistemos atžvilgiu: $\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1}{t} + \frac{\vec{s}_2}{t}$. Iš šios išraiškos išplaukia, kad

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2, \tag{8}$$

čia $\vec{v}_2$ – plausto greitis kranto atžvilgiu (upės tėkmės greitis). 8 formulė dar vadinama greičių sudėties formule.

Kūno greitis nejudančios atskaitos sistemos atžvilgiu lygus geometrinei sumai dviejų greičių: kūno greičio judančios atskaitos sistemos atžvilgiu ir judančios atskaitos sistemos greičio nejudančios sistemos atžvilgiu.

Kūno poslinkis ir jo greitis skirtingų atskaitos sistemų atžvilgiu yra skirtingas. Skirtingos ir kūno judėjimo trajektorijos (CC_1 – judančios sistemos atžvilgiu, O_1C_1 – nejudančios sistemos atžvilgiu). *Tai ir yra judėjimo reliatyvumo esmė – skirtingų atskaitos sistemų atžvilgiu tas pats kūnas nagrinėjamu laiko momentu juda nevienodu greičiu.*

Klausimai ir užduotys

1. Virš upės pasroviui skrenda malūnsparnis. Kaip teka upės vanduo žiūrint iš malūnsparnio?

2. Kokia trajektorija juda tiesiai ir tolygiai skrendančio lėktuvo propelerio mentės galas atskaitos sistemose, susietose su propeleriu? su lėktuvo korpusu? su Žeme?

3. Ar gali kylančiame metro eskalatoriuje stovintis žmogus nejudėti atskaitos sistemos, susietos su Žeme, atžvilgiu? Kodėl?

4. Kodėl dirbtiniai Žemės palydovai (DŽP) nuo Žemės leidžiami rytų kryptimi?

5. Valtis plaukia pasroviui 20 km/h greičiu, o prieš srovę – 18 km/h greičiu kranto atžvilgiu. Koks yra upės tėkmės greitis kranto atžvilgiu ir koks – valties greitis vandens atžvilgiu?

6. Du traukiniai važiuoja vienas prieš kitą 54 km/h ir 72 km/h greičiu. Pirmuoju traukiniu važiuojantis keleivis pastebi, kad antrasis traukinys pralekia pro jį per 4 s. Kokio ilgio yra antrasis traukinys?

7. Metro eskalatorius juda 0,7 m/s greičiu. Per kiek laiko keleivis, lipdamas eskalatoriumi jo judėjimo kryptimi 0,3 m/s greičiu, pasislinks Žemės atžvilgiu 30 m?

9. Tiesiaeigis tolygiai kintamas judėjimas

Tiesiaeigis tolyginis judėjimas (pastovaus greičio modulio ir krypties) retai pasitaiko. Kur kas dažniau stebime judėjimą, kurio greitis laikui bėgant kinta. Taip juda automobiliai, lėktuvai, krintantys arba vertikaliai aukštyn išmesti kūnai.

Jeigu kinta greičio didumas, tai judėjimas yra kintamasis. Nagrinėsime tik vieną jo rūšį – *tiesiaeĩgį tolýgiai kiñtamą judė́jimą*, kai greičio vektorius yra vienoje tiesėje, o didumas kinta nuolat ir vienodai.

Dažnai daugelyje judėjimų galime įžiūrėti dviejų judėjimų sumą: lėktuvo kilimas gali būti laikomas dviejų tiesiaeigių tolyginių judėjimų (horizontalia ir vertikalia kryptimi) suma, o mesto kampu į horizontą akmens judėjimas yra tiesiaeigio tolyginio ir tolygiai kintamo judėjimų suma. Judėjimų nepriklausomumo principas teigia, kad jie vyksta pagal savus dėsningumus nepriklausomai vienas nuo kito.

Nagrinėdami tolygiai kintamą judėjimą, negalime taikyti poslinkio apskaičiavimo formulės $(\vec{s} = \vec{v}\,\Delta t)$, nes greitis įvairiose trajektorijos vietose ir įvairiais laiko momentais yra nevienodas.

Kaip apskaičiuoti netolygiai judančio kūno poslinkį bei jo koordinates? Koks yra netolyginio judėjimo greitis?

Nagrinėdami tolygiai kintamą judėjimą, dažnai vartojame *vidutìnio greĩčio* terminą.

Jei per tam tikrą laiko tarpą Δt kūnas atlieka poslinkį $\vec{s}$, tai, s padaliję iš Δt, gausime vidutinį greitį:

$$\vec{v}_{\text{vid}} = \frac{\vec{s}}{\Delta t}. \qquad (9)$$

Iš formulės matyti, kad vidutiniù greičiù vadinamas viso nueito kelio ir jam nueiti sugaišto laiko santykis.

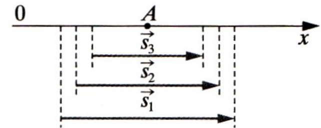
Pavyzdžiui, atstumas tarp Kauno ir Vilniaus lygus 90 km. Šį kelią automobilis nuvažiuoja per 1,5 h. Suprantama, jog automobilio vidutinis greitis bus 60 km/h. Tačiau gali būti, jog dalį laiko, sugaišto kelyje Kaunas–Vilnius, automobilis stovėjo, paskui, pradėjęs judėti, važiavo didesniu greičiu, o prieš pat Vilnių važiavo lėčiau. Apskaičiuojant vidutinį greitį, į visa tai neatsižvelgiama. Tad galime daryti išvadą, jog vidutinis greitis neparodo tikrojo automobilio judėjimo greičio. Žinodami vidutinį greitį, poslinkį randame pagal formulę $\vec{s} = \vec{v}_{vid}\Delta t$. Šią formulę taikome tik tam trajektorijos ruožui, kuriame yra žinomas vidutinis greitis. Jeigu, žinodami vidutinio greičio vertę (60 km/h), apskaičiuosime automobilio poslinkį ne per 1,5 h, o per 0,5 h ar per 45 min, tai gausime klaidingą atsakymą, nes vidutinis greitis per 1,5 h nėra lygus vidutiniam greičiui per 0,5 h ar per 45 min.

Žinant vidutinį greitį, negalima rasti judančio kūno poslinkio, kūno koordinatės (padėties) bet kuriuo laiko momentu.

Kūno padėčiai bet kuriuo laiko momentu nusakyti reikia žinoti ne vidutinį, o *akimirkìnį* kūno judėjimo *greĩtį*.

Akimirkiniù, arba momeñtiniu, greičiù vadinamas kūno greitis tam tikru laiko momentu arba tam tikrame trajektorijos taške.

Tarkime, kad kuris nors kūnas (kaip visada, turime galvoje vieną to kūno tašką) juda tiesiai, bet netolygiai. Kaip apskaičiuoti jo akimirkinį greitį kuriame nors trajektorijos taške A (15 pav.)?



15 pav.

Išskirkime toje trajektorijoje nedidelį atstumą, kuriame yra taškas A. Mažą kūno poslinkį tame atstume pažymėkime $\vec{s}_1$, o mažą laiko tarpą, per kurį jis atliktas, – Δt_1. Padaliję $\vec{s}_1$ iš Δt_1, sužinosime vidutinį kūno judėjimo greitį tame atstume; juk greitis kinta tolydžiai ir įvairiose šio atstumo vietose yra skirtingas. Pasirinkime kitą atstumą (žr. 15 pav.), kuriame taip pat yra taškas A. Šiame atstume poslinkį $\vec{s}_2$ $(\vec{s}_2 < \vec{s}_1)$ kūnas atliks per trumpesnį laiką Δt_2, todėl greitis nagrinėjamame atstume pakinta mažesniu dydžiu. Santykis $\vec{s}_2/\Delta t_2$ lygus vidutiniam greičiui šioje mažesnėje atkarpoje. Dar didesnis greičio pokytis yra trečiojoje atkarpoje (kurioje taip pat yra taškas A), nes $\vec{s}_3 < \vec{s}_2 < \vec{s}_1$. Padalijęposlinkį $\vec{s}_3$ iš laiko Δt_3, vėl gausime vidutinį greitį šiame mažiausiame atstume.

Tolydžiai mažinant laiko tarpą, kuriame nagrinėjamas judančio kūno poslinkis, mažės ir kūno greičio pokytis. Galiausiai laiko tarpas tiek sutrumpės, kad greičio pokyčio per tą laiką bus galima nepaisyti (kūnas judės tarsi tolygiai). Trajektorijos ruožas, kurį kūnas nueis per visai trumpą laiko tarpą, tarsi susitrauks į tašką A, o laiko tarpas – į laiko momentą. Tuomet vidutinis greitis ir taps kūno akimirkiniu greičiu taške A.

Akimirkìnis greĩtis (arba greitis tam tikrame trajektorijos taške) lygus pakankamai mažo poslinkio, kuriam priklauso nagrinėjamas taškas, ir santykinai mažo laiko tarpo, per kurį atliekamas šis poslinkis, santykiui.

Akimirkinis greitis – vektorinis dydis. Jo kryptis sutampa su judėjimo kryptimi nagrinėjamame taške. Todėl, kai kalbama apie tolygiai kintamo judėjimo greitį, turima omeny, jog tai yra akimirkinis greitis.

Apibendrinkime būdą, kuriuo remiantis įvesta akimirkinio greičio sąvoka. Trajektorijos ruožas ir laikas, per kurį jis nueinamas, mintyse tolydžiai mažinami tol, kol ruožo jau negalima atskirti nuo taško, o tolygiai kintamo judėjimo – nuo tolyginio. Šis metodas taikomas tyrinėjant reiškinius, kuriems vykstant tolydžiai kinta kokie nors dydžiai.

Tuo atveju, kai judant kūnui (materialiajam taškui), kinta greičio vektorius $\vec{v}$, judėjimui apibūdinti įvedama greičio kitimo charakteristika – *pägreitis a*. Sakykime, kad pradiniu laiko momentu t_0 kūno greitis buvo $\vec{v}_0$, o galiniu laiko momentu t greitis buvo $\vec{v}$. Per laiką $\Delta t = t - t_0$ greitis pakito dydžiu $\Delta\vec{v}\,(\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0)$, kurio kryptį ir didumą apsprendžia vektorių $\vec{v}$ ir $\vec{v}_0$ skirtumas.

Pägreičiu *a* (greĩčio kitìmo spartà) vadinamas fizikinis dydis, lygus greičio pokyčiui per laiko vienetą:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t - t_0} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}. \qquad (10)$$

Iš šios lygties matyti, kad pagreičio vektoriaus kryptis sutampa su greičio pokyčio $\Delta\vec{v}$ kryptimi.

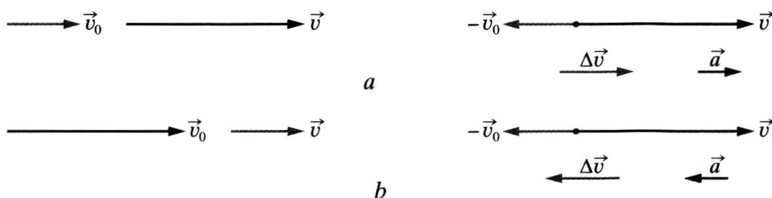
Keli greičio pokyčio $\Delta\vec{v}$ radimo atvejai pavaizduoti 16 paveiksle: kai kinta tik greičio didumas, pagreitis $\vec{a}$ nukreiptas greičio kryptimi (16 pav., *a*) arba priešinga greičiui kryptimi (16 pav., *b*). Pirmuoju atveju greitis didėja – toks judėjimas vadinamas *tolýgiai greitéjančiu judéjimu*, antruoju atveju – greitis mažėja, ir stebimas *tolýgiai lėtéjantis judéjimas*.

Tiesiaeigis tolyginis judėjimas, kai kūno greitis per vienodus laiko tarpus pakinta vienodu dydžiu, vadinamas tolýgiai kiñtamu judéjimu.

Tolygiai kintamo judėjimo pagreitis yra pastovus (a = const). Kūno greičiui per laiko tarpą Δt tolygiai pakitus nuo $\vec{v}_0$ iki $\vec{v}$, pagreičio $\vec{a}$ didumas išreiškiamas pagal formulę

$$a = \frac{v - v_0}{\Delta t}. \qquad (11)$$

Kai $v - v_0 = 1$ m/s ir $\Delta t = 1$ s, tai $[a] = 1\ \text{m/s}^2 = 1\ \text{ms}^{-2}$.



16 pav.

1 m/s² – tai toks pagreitis, kai per 1 s kūno greitis pakinta 1 m/s.

Pagal 11 formulę tolygiai kintamo judėjimo greitis bet kuriuo laiko momentu gali būti apskaičiuojamas taip: $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ arba, suprojektavus į x ašį, nukreiptą išilgai $\vec{v}$ ir $\vec{v}_0$, taip:

$$v = v_0 \pm at. \tag{12}$$

Šioje lygtyje „+“ parodo, kad kūno pagreitis yra teigiamas ($a > 0$), t. y. kūnas juda vis didėjančiu greičiu; „–“ – kad kūno greitis mažėja ir jo pagreitis neigiamas ($a < 0$). Jei kūnas pajuda iš rimties būsenos ($v_0 = 0$), tai greitis bet kuriuo laiko momentu tiesiog proporcingas judėjimo laikui:

$$v = at. \tag{13}$$

12 ir 13 lygčių grafikai pavaizduoti 17 paveiksle. Jame pateiktas greičio priklausomybės nuo laiko t grafikas, kai pagreitis yra teigiamas ($a > 0$). Figūros $OABC$ plotas lygus kūno nueitam keliui (arba poslinkiui), o subrūkšniuotas stačiakampis iliustruoja poslinkį Δs, atliktą per ganėtinai trumpą laiką Δt, kūnui judant vidutiniu greičiu: $\Delta s = v_{vid}\Delta t$. Trapecijos, kurios pagrindai v_0 ir $v_0 + \vec{a}t$ (jei $a < 0$, tai $v_0 - at$), o aukštinė – t, plotas apskaičiuojamas taip: $S_{OABC} = s = \frac{v_0 + v_0 \pm at}{2}t$. Sutraukiame panašius narius ir gauname:

$$s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}. \tag{14}$$

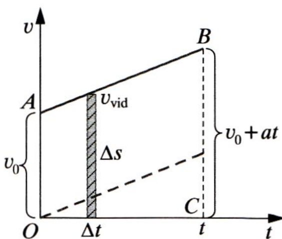
Jei kūnas juda iš rimties būsenos ($v_0 = 0$), tai

$$s = \frac{at^2}{2}. \tag{15}$$

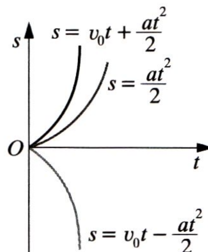
Poslinkio priklausomybės nuo laiko grafikas, iliustruojantis 14 formulę, parodytas 18 paveiksle.

Parinkime koordinačių ašį x taip, kad jos kryptis sutaptų (arba būtų priešinga) su greičio $\vec{v}_0$ ir pagreičio $\vec{a}$ kryptimis. Tada kūno, pradiniu laiko momentu buvusio taške x_0 ir pradėjusio judėti greičiu $\pm v_0$, pagreičiu $\pm a$, padėtis erdvėje x keičiasi taip:

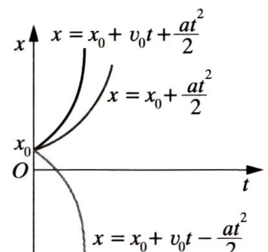
$$x = x_0 \pm v_0 t \pm \frac{at^2}{2}. \tag{16}$$



17 pav.



18 pav.



19 pav.

Pagal 16 lygtį, kūno, judančio tolygiai kintamu greičiu, padėtį erdvėje galima nustatyti bet kuriuo laiko momentu. Tai – tolygiai kintamo judėjimo kinematinė lygtis. Grafiškai ji pavaizduota 19 paveiksle. Pertvarkius 14 ir 12 formules, gaunama lygtis, kuri sieja kūno judėjimo greitį v ir poslinkį s:

$$v^2 - v_0^2 = 2as. \qquad (17)$$

Kai pradinis greitis lygus 0 ($v_0 = 0$), tai

$$v^2 = 2as. \qquad (18)$$

Vienas iš tiesiaeigio tolygiai kintamo judėjimo pavyzdžių yra **laisvàsis kū̃no kritìmas. Taip juda kūnas, kurį veikia tik Žemės traukos jėga.** Šią judėjimo rūšį 1583 m. išnagrinėjo G. Galilėjus, stebėdamas švininio rutulio, kamščio ir plunksnos kritimą stikliniame vamzdyje, iš kurio buvo išsiurbtas oras. G. Galilėjus įsitikino, jog visi vamzdyje esantys daiktai nuo viršaus iki dugno krenta vienodą laiko tarpą, t. y. Žemės traukos jėga suteikia jiems vienodą pagreitį $g = 9{,}8$ m/s^2. Laisvai krintančio kūno judėjimo lygtys užrašomos analogiškai 12–18 lygtims, pakeičiant jose poslinkio ir pagreičio žymėjimus: $s \to h$ ir $a \to g$.

$$v = v_0 + gt, \quad h = v_0 t + \frac{gt^2}{2}, \quad v^2 - v_0^2 = 2gh; \qquad \text{kai} \quad v_0 = 0, \quad \text{tai} \qquad v = gt, \quad h = \frac{gt^2}{2}, \quad v^2 = 2gh. \qquad (19)$$

Šiose lygtyse fizikinių dydžių ženklai nurodo, kad poslinkio $\vec{h}$, pradinio greičio $\vec{v}_0$ (jei kūnas mestas žemyn, o ne paleistas kristi iš ramybės būsenos) ir pagreičio $\vec{g}$ kryptys sutampa. Jei norėtume parašyti judėjimo lygtis vertikaliai aukštyn mestam kūnui, reikėtų atsižvelgti į pagreičio $\vec{g}$ ir greičių $\vec{v}$ bei $\vec{v}_0$ krypčių nesutapimą, o ženklą „+“ pakeisti ženklu „–“.

Klausimai ir užduotys

1. Kuo skiriasi kintamasis judėjimas nuo tolygiai kintamo? Kokius greičius tenka išskirti nagrinėjant taško kintamąjį judėjimą?

2. Koks yra tolyginio judėjimo akimirkinis greitis?

3. Ką vadiname tolygiai kintamo judėjimo pagreičiu? Kokia jo kryptis?

4. Kaip juda kūnas, jeigu jo pagreitis lygus nuliui?

5. Pirmąją pusę kelio automobilis važiavo 60 km/h greičiu, antrąją – 65 km/h greičiu. Koks yra automobilio vidutinis greitis?

6. Atstumą s tarp miestų autobusas nuvažiuoja greičiu v. Kokiu greičiu autobusas turi sugrįžti, kad vidutinis jo greitis būtų lygus 1,2 v?

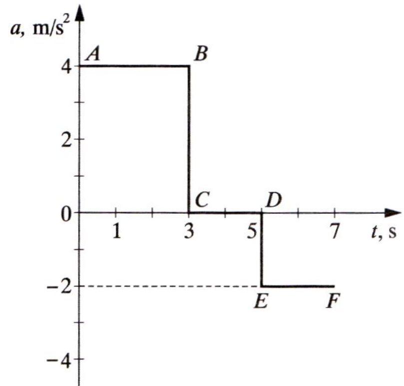
7. Koks yra pagrindinis tolygiai greitėjančio judėjimo požymis?

8. Pradėjęs važiuoti automobilis per 6 s įgijo 15 m/s greitį. Po kiek laiko jis važiuos 25 m/s greičiu? Nubraižykite greičio grafiką.

9. Berniukas nuo kalvos paleidžia riedėti padangą. Ji rieda 3 m/s² pagreičiu. Kokį kelią ji nuriedės per 8 s?

10. Dviratininkas, nemindamas pedalų, leidžiasi nuo kalno 2,5 m/s² pagreičiu. Per kiek laiko dviratininko greitis padidės nuo 5 m/s iki 20 m/s? Kokį atstumą dviratininkas nuvažiuos per tą laiką?

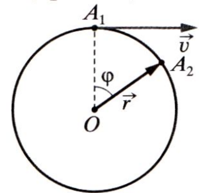
11. Kokios rūšies judėjimą vaizduoja kiekviena grafiko dalis? Kiek ir kaip pakinta greitis per laiko tarpus, atitinkančius kiekvieną dalį? Nubraižykite greičio grafiką.



10. Materialiojo taško judėjimas apskritimu

Kūno (materialiojo taško) judėjimas apskritimu – tai paprasčiausias *kreivaeĩgio judė̃jimo* atvejis. Šis judėjimas gali būti tolyginis ir kintamasis. Susipažinsime su tolyginiu kreivaeigiu judėjimu.

Kreivaeigis (sukamasis) judėjimas dažniausiai apibūdinamas kampiniu ir linijiniu greičiais ir pagreičiu. Kad galėtume suprasti šių fizikinių dydžių prasmę, tarkime, kad materialusis taškas (kūnas), tolygiai judantis apskritimu, per laiką t pasislenka iš padėties A_1 į padėtį A_2 (20 pav.). Taško spindulys r pasisuka kampu φ (fi), kuris vadinamas posūkio kampu. **Kampo, kuriuo spindulys pasisuka per laiko vienetą, santykis su pasisukimo laiku vadinamas kampiniù greičiù.** Kampinis greitis žymimas graikiška raide ω (omega):



20 pav.

$$\omega = \frac{\varphi}{t}. \qquad (20)$$

Kai $\varphi = 1$ rad ir $t = 1$ s, tai $[\omega] = 1$ rad/s.

Kampìnio greĩčio víenetu laikomas toks greitis, kai spindulys vektorius per 1 s pasisuka 1 rad kampu. Radianas lygus 57,3°.

Tolyginis judėjimas apskritimu yra periodinis, nes po tam tikro laiko tarpo, vadinamo *periodù* T, judėjimas kartojasi. Per vieną **periòdą T – laiko tarpą, per kurį kūnas padaro vieną pilną apsisukimą**, spindulys nubrėžia 2π rad kampą. Taigi kampinį greitį galima išreikšti ir taip:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \qquad (21)$$

Tolyginio sukimosi kampinį greitį lengva rasti žinant **sukìmosi dãžnį f, apsisukimų skaičių n per laiko vienetą**. Taškui padarant vieną apsisukimą, spindulys

nubrėžia kampą 2π rad. Vadinasi, jei taškas per laiko vienetą apskritimą apskrieja n kartų, tai jo kampinis greitis

$$\omega = 2\pi f, \tag{22}$$

nes $f = \frac{n}{T} = \frac{1}{T}$.

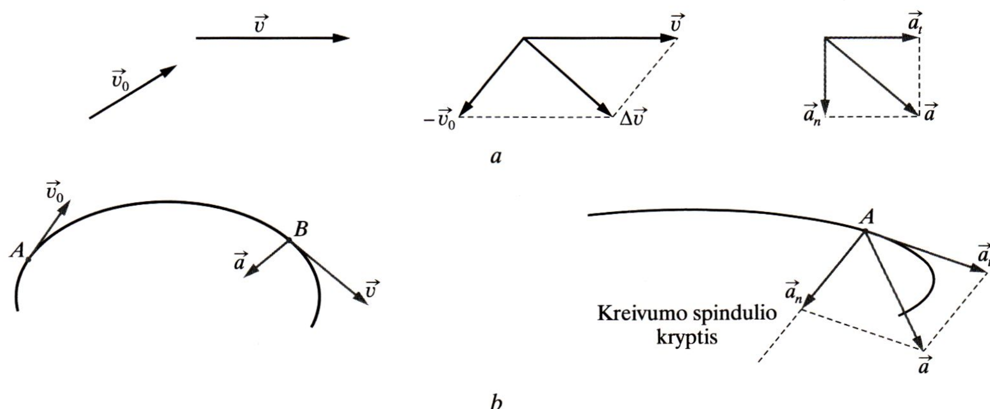
Kūno judėjimas apskritimu dar gali būti apibūdinamas ir *linijiniù greičiù*. Pasislinkdamas iš padėties A_1 į padėtį A_2 (20 pav.), taškas nueina kelią, lygų lankui $\cup A_1A_2$. Šį lanką galima išreikšti centrinio kampo φ ir spindulio sandauga: $\cup A_1A_2 = \varphi r$. Padaliję abi puses iš laiko t, matome, kad narys $\frac{\cup A_1A_2}{t}$ yra linijinis greitis v, o $\frac{\varphi}{t}$ – kampinis greitis ω. Tokiu būdu gauname ryšį tarp linijinio ir kampinio greičių:

$$\vec{v} = \omega\vec{r}. \tag{23}$$

Iš šios formulės matyti, kad kūno (materialiojo taško) linijinis greitis, skirtingai nuo kampinio greičio, priklauso nuo atstumo tarp nagrinėjamo kūno ir sukimosi centro r (kitaip dar vadinamo judėjimo trajektorijos kreivumo spinduliu) ir yra nukreiptas liestinės kryptimi (20 pav.).

Kai kinta greičio kryptis ir didumas, pagreičio vektorių a galima išskaidyti į du vektorius (21 pav., a): $\vec{a}_t$, sutampantį su trajektorijos liestinės kryptimi, ir $\vec{a}_n$, statmeną jam. Šie vektoriai vadinami *tangeñtiniu ir normãliniu pãgreičiais*. **Normãlinio (arba statmenojo) pãgreičio vektorius apibūdina tik greičio krypties kitimą ir yra visada statmenas greičio vektoriui nagrinėjamame trajektorijos taške** (21 pav., b). **Tangeñtinio pãgreičio vektorius apibūdina greičio didumo kitimą, o jo kryptis sutampa su trajektorijos liestine, išvesta per nagrinėjamąjį tašką.**

Kadangi tolygiai apskritimu judančio kūno linijinio greičio modulis nekinta, kinta tik jo kryptis, tai kūnas visada juda tam tikru pagreičiu. Šis pagreitis susideda iš tangentinio pagreičio $\vec{a}_t$ ir normalinio pagreičio $\vec{a}_n$, t. y. $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n$.



21 pav.

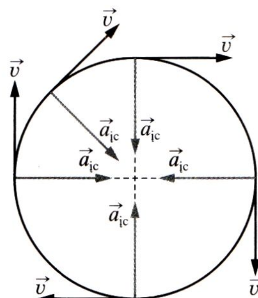
Iš 21 paveikslo, a, brėžinio matome, kad pagreičio modulį galima išreikšti tokia lygtimi:

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_t^2}. \quad (24)$$

Tangentinis pagreitis parodo greičio dydžio kitimo spartą ir yra nukreiptas trajektorijos liestine. Normalinis pagreitis išreiškia greičio krypties kitimo spartą ir yra nukreiptas į trajektorijos kreivumo centrą O bei statmenas linijinio greičio vektoriui. Normalinio pagreičio modulis

$$a_{ic} = a_n = \frac{v^2}{r}. \quad (25)$$

Kadangi tolygiai apskritimu judančio kūno $a_t = 0$, tai $a_{ic} = a_n$. Tokią normalinio pagreičio kryptį apsprendžia įvairios kilmės jėgos (traukos, trinties, tamprumo, Kulono ir t. t.), nukreiptos į judančio kūno brėžiamos trajektorijos centrą (22 pav.).



22 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname apsisukimo periodu bei dažniu?

2. Koks yra ryšys tarp apsisukimo periodo ir dažnio?

3. Kaip normalinis pagreitis išreiškiamas apsisukimo periodu?

4. Automobilio ratai, kurių spindulys 30 cm, per 1 min apsisuka 600 kartų. Kokiu greičiu važiuoja automobilis?

5. Mėnulis, nutolęs 38 000 km nuo Žemės, apskrieja aplink ją per 27,3 paros. Apskaičiuokite Mėnulio normalinį pagreitį.

6. Koks laikrodžio minutinės rodyklės sukimosi periodas, sukimosi dažnis ir kampinis greitis?

7. Vidutinis Žemės atstumas nuo Saulės $1{,}5 \cdot 10^8$ km. Apskaičiuokite, kokiu greičiu Žemė skrieja savo orbita.

8. Kokiame aukštyje apskritimine orbita turi skrieti Žemės palydovas, kad jo sukimosi periodas būtų lygus pusei paros?

9. Įpilkite pusę kibirėlio vandens. Pabandykite apsukti jį ratu, neišliedami vandens. Kokia jėga išlaiko vandenį neišsipylusį, kai kibirėlis yra virš galvos?

10. Kada patefono adapterio adatos greitis plokštelės atžvilgiu yra didžiausias: kai adata yra plokštelės pakraštyje ar kai viduryje? Atsakymą pagrįskite.

11. Vilniaus televizijos bokšto apžvalgos aikštelė apsisuka vieną kartą per 57 min. Jos skersmuo 32 m. Apskaičiuokite aikštelės: a) kampinį greitį; b) linijinį greitį; c) taško, esančio už 8 m nuo sukimosi ašies, linijinį greitį; d) sūkių skaičių per 8 valandas.

12. Vilkelis, sukdamasis 40 s^{-1} dažniu, laisvai krinta iš 5 m aukščio. Kiek kartų jis suspės apsisukti, kol nukris ant žemės?

2 SKYRIUS. DINAMIKA

Dinamika nagrinėja kūnų judėjimą, atsižvelgdama į sąveiką, t. y. į judėjimą sukeliančias priežastis. Klasikinėje mechanikoje visi dinamikos uždaviniai sprendžiami remiantis trimis Niutono dėsniais. Šie dėsniai nėra taikytini aprašant elementariųjų dalelių judėjimą ir judėjimą šviesai artimu greičiu.

11. Pirmasis Niutono dėsnis

Pastūmę ant horizontalios lentos padėtą rutulį, pamatysime, kad jis ims riedėti tiesia linija, palaipsniui mažindamas greitį, kol galiausiai sustos. Iš šio bandymo darome išvadą, kad rutulio rimties būsenos arba judėjimo pakitimo priežastis yra kiti kūnai: pastumdami rutulį ranka, suteikėme jam greitį, o veikiamas lentos paviršiaus ir oro, rutulys sustojo. Reikia prisiminti, kad bet koks judančio kūno greičio kitimas yra apibūdinamas pagreičiu. Todėl galime tvirtinti, kad kūnai įgauna pagreitį, tik sąveikaudami su kitais kūnais. Kūnų sąveika gali būti skirtingos prigimties ir įvairiai pasireikšti. *Sąveikos matas yra jėgà.* **Jėgà – tai fizikinis dydis, apibūdinantis vieno kūno poveikį kitam kūnui.**

Pakartoję bandymą su rutuliu ant lygesnio paviršiaus, pastebėsime, kad, pastumtas tokio pat didumo jėga, jis riedės gerokai ilgiau. Galima daryti išvadą, kad idealiai lygiu paviršiumi beorėje erdvėje rutulys riedėtų be galo ilgai. Tuo pačiu galime spėti, kad, neveikiamas kitų kūnų, rutulys judėtų tiesiai ir tolygiai. **Judėjimas, kai neveikia išoriniai kūnai, vadinamas inèrciniu judéjimu, o kūnų savybė išlaikyti tiesiaeigio ir tolyginio judėjimo būseną vadinama inèrcija** (rimties būseną irgi galima vadinti tiesiaeigiu tolyginiu judėjimu, kurio $v = 0$). *Inercija yra viena iš pagrindinių materijos savybių.*

Pirmasis dinamikos, arba pirmasis Niutono, dėsnis teigia, kad **kiekvienas kūnas išlaiko rimties arba tiesiaeigio ir tolyginio judėjimo būseną, jei jo nepaveikia kiti kūnai.**

Eksperimentiškai šis dėsnis nėra patikrintas, nes negalima sudaryti tokių sąlygų, kad kūno neveiktų kiti kūnai, nors gyvenimo patirtis ir įrodo jo teisingumą.

Pirmasis Niutono dėsnis nėra teisingas kiekvienos atskaitos sistemos atžvilgiu. Tarkime, kad vagone, judančiame Žemės atžvilgiu tiesiai ir tolygiai, ant lentynos guli padėtas koks nors kūnas. Su vagonu susijusios atskaitos sistemos atžvilgiu šis kūnas yra rimtyje. Jei vagonas pradeda judėti lėtėdamas, greitėdamas arba keičia judėjimo kryptį, tai kūnas vagono atžvilgiu pradeda judėti ir gali net nukristi nuo lentynos, nors jo neveikia jokie aplinkos kūnai. Vadinasi, pasirinkus atskaitos sistemą, susijusią su pagreitį turinčiu kūnu (vagonu), pirmasis Niutono dėsnis negalioja. Kad tokiais atvejais būtų galima taikyti analogiškas Niutono dėsniams formules, įvedama *inèrcijos jėgų̃* sąvoka. **Jėgos, veikiančios kūnus judančiose su pagreičiu atskaitos sistemose, vadinamos inèrcijos jėgomìs.** Šios jėgos yra savotiška abstrakcija, nes negalima nurodyti kūnų, kurių veikimas sukelia šias jėgas – jos reiškia tik tai, kad atskaitos sistema juda su pagreičiu.

Ant lentynos esančio kūno judėjimas lengvai paaiškinamas, stebint jį susijusios su Žeme atskaitos sistemos atžvilgiu. Keičiantis vagono judėjimo greičiui ar krypčiai, kūnas išlaiko ankstesnį tiesiaeigį judėjimą Žemės atžvilgiu (jei jo neveikia pakankamai didelė trinties į lentyną jėga). Pirmasis Niutono dėsnis galioja su Žeme susijusios atskaitos sistemos atžvilgiu. **Atskaitos sistemos, kuriose nepasireiškia inercijos jėgos, t. y. kurių atžvilgiu galioja pirmasis Niutono dėsnis, vadinamos inèrcinėmis.** Spręsdami uždavinius, inercinėmis galime laikyti atskaitos sistemas, susijusias su Žeme arba judančias Žemės atžvilgiu tiesiai ir tolygiai. Tačiau pastarosios sistemos, skaičiuojant tiksliai, nėra inercinės, nes Žemė sukasi apie savo ašį (jos paviršiaus taškai turi normalinį pagreitį) ir, be to, juda apie Saulę tam tikru, kad ir mažu, pagreičiu. Gana tikslios inercinės atskaitos sistemos yra tos, kurios susijusios su žvaigždėmis arba tos, kurios juda žvaigždžių atžvilgiu tiesiai ir tolygiai.

Klausimai ir užduotys

1. Sportininkai bando irtis prieš srovę, bet valtis nejuda kranto atžvilgiu. Kurių kūnų poveikis valčiai kompensuojasi?

2. Kas yra inercijos reiškinys?

3. Kokia inertiškumo savybės esmė?

4. Autostrada važiuojančiame autobuse vaikas padėjo sviedinį ant grindų praėjime tarp krėslų. Kaip judės sviedinys, kai autobusas lėtės, greitės, važiuos vienodu greičiu?

12. Antrasis Niutono dėsnis. Jėga. Masė

Jėgà – tai kūnų sąveikos rezultatas; ji pasireiškia tuo, kad kūnai ar jų dalys įgyja pagreitį. Todėl apie jėgos didumą galime spręsti iš pagreičio, kurį ši jėga suteikia etaloniniam kūnui. **Jėga yra vektorinis dydis, apibūdinamas didumu, kryptimi ir veikimo tašku.**

Gamtoje žinomos keturios jėgų rūšys: *gravitãcijos, elektromagnètinė, branduolìnė ir silpnũjų sąveikų jėgà*. Pagal poveikio perdavimo mechanizmą visas jėgas galima suskirstyti į dvi klases: 1) jėgos, kurios atsiranda, tiesiogiai kūnams liečiantis; 2) jėgos, veikiančios per atstumą. Pirmajai klasei priklauso tamprumo ir trinties jėgos, o antrajai – gravitacijos, elektromagnetinės, branduolinės ir silpnųjų sąveikų jėgos. Bandymais nustatyta, kad to paties kūno greičio pokytis – pagreitis – yra tiesiogiai proporcingas jį veikiančiai jėgai: kuo didesne jėga veiksime kūną, tuo didesnį pagreitį jis įgis. Veikiančią jėgą pažymėję $\vec{F}$, įgytą pagreitį $\vec{a}$, šį proporcingumą galime užrašyti taip: $\vec{a} \sim \vec{F}$.

Jei vienodomis jėgomis paveiksime skirtingus kūnus, tai pastebėsime, kad jų įgyti pagreičiai bus skirtingi. Vadinasi, pagreitis priklauso ne tik nuo veikiančios jėgos didumo, bet ir nuo kūnų, kuriuos veikia jėga, masės. Kūnų įgyti pagreičiai, veikiant juos vienodo didumo jėgomis, yra atvirkščiai proporcingi jų masėms m:

$a \sim \frac{1}{m}$. **Kūnų pasipriešinimą rimties ar tiesiaeigio tolyginio judėjimo būsenos kitimui vadiname inèrcija.** Vadinasi, **mãsė yra kūnų inercijos matas.**

Abu šiuos teiginius apibendrina antrasis Niutono dėsnis: **pagreitis, kuriuo juda kūnas, yra tiesiogiai proporcingas jį veikiančių jėgų atstojamajai ir atvirkščiai proporcingas to kūno masei.** Šio dėsnio matematinė išraiška yra tokia:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \qquad (26)$$

Ši vektorinė lygtis parodo, jog kūno pagreičio vektoriaus kryptis sutampa su veikiančios jėgos kryptimi. Antrąjį Niutono dėsnį galima užrašyti ir judėjimo lygtimi:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \qquad (27)$$

Kūną veikianti jėga skaitiniu didumu lygi to kūno masės ir įgyto pagreičio sandaugai. Įrašę dydžių matavimo vienetus (m = 1 kg; a = 1 m/s^2), gauname tarptautinės SI vienetų sistemos jėgos vienetą – *niutòną*: $[F]$ = 1 kg · 1 m/s^2 = = 1 kg · m/s^2 = 1 N.

1 N – tai tokia jėga, kuri 1 kg masės kūnui suteikia 1 m/s^2 pagreitį.

Antrasis Niutono dėsnis siejasi su anksčiau aptartu pirmuoju Niutono dėsniu: jei kūno neveikia jėgos arba jų veikimas kompensuojasi (F = 0), tai a = 0 ir kūnas juda be pagreičio, t. y. tiesiai ir tolygiai arba išlieka ramybės būsenos.

I. Niutonas teigė, kad masė yra nekintantis dydis, apibūdinantis medžiagos kiekį kūne. Tokia pažiūra moksle vyravo ilgą laiką. Tačiau mūsų šimtmečio pradžioje A. Einšteinas, sukūręs reliatyvumo teoriją, įrodė, kad kūno masė priklauso nuo judėjimo greičio: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$; čia m_0 – kūno rimties masė, m – to paties kūno masė, jam judant greičiu v, o c – šviesos greitis vakuume. Ši formulė rodo, kad, kūno greičiui v artėjant prie šviesos greičio c, santykis $\frac{v^2}{c^2}$ artėja prie vieneto, o visas trupmenos vardiklis $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ – prie nulio. Vadinasi, kūno masė artėja prie begalybės. Taigi, didėjant kūno greičiui, jo masė didėja. Šią išvadą patvirtina ir eksperimentų rezultatai.

Kūno masė – viena pagrindinių materijos savybių. Anksčiau ši savybė buvo laikoma nekintanti, tačiau naujausi mokslo pasiekimai rodo, kad masė kinta priklausomai nuo kūno greičio ir jo būsenos. Todėl masės apibrėžimas (medžiagos kiekio kūne matas) pasirodė nepakankamas, nes masės kitimo, kintant greičiui, negalima paaiškinti kūno medžiagos kiekio pakitimu. Remiantis antruoju Niutono dėsniu, teigiame, jog **masė yra kūno inertiškumo matas. Kuo didesnė kūno masė, tuo didesnė jo inercija ir atvirkščiai**. Kūnų masės didėjimas, didėjant greičiui, aiškinamas inertiškumo pasikeitimu: kuo greičiau juda kūnas, tuo didesnė jo iner-

cija, tuo sunkiau pakeisti jo greičio dydį bei kryptį, t. y. suteikti jam pagreitį. Pavyzdžiui, padidinti kūno greitį nuo 297 000 km/s iki 298 000 km/s, t. y. 1000 km/s yra sunkiau, negu padidinti greitį nuo 7000 km/s iki 8000 km/s, nes pirmuoju atveju yra didesnė kūno inercija, o tuo pačiu – didesnė ir jo masė.

Masės kitimas priklausomai nuo greičio pastebimas tik tada, kai kūno greitis artimas šviesos greičiui. Tuo tarpu praktikoje dažniausiai stebime tokius atvejus, kai $v \ll c$, ir tuo atveju – judančio kūno masė lygi jo rimties masei ($m \approx m_0$).

Suprasti masę vien kaip kūno inertiškumo matą nepakanka. Yra reiškinių, kurie (pavyzdžiui, gravitacijos reiškinys) praplečia masės sąvoką. Niutono nustatytas visuotinės traukos dėsnis rodo ir kitas masės savybes: kiekvienas kūnas sukuria *gravitãcijos laũką*, priklausantį nuo to kūno masės, ir savo ruožtu gravitacijos laukas veikia kiekvieną kūną jėga, kurios didumas taip pat priklauso nuo to kūno masės. Čia susiduriame su vadinamąja *gravitãcine masè*. Taigi vienu atveju masė apibūdina kūnų inercines savybes, o kitu atveju – gravitacines. Bandymai rodo, kad bet kuriame kūne visada pasireiškia abi minėtosios masės savybės – nėra kūnų, turinčių vien inercinę arba vien gravitacinę masę. Tyrimai taip pat patvirtina inercinės ir gravitacinės masių tapatumą: niekada nerasime skirtumo tarp masės, nustatytos pagal kūno inercines ar gravitacines savybes. Apibendrinant galima teigti, jog **masė yra materijos inertiškumo ir gravitacinių savybių matas.**

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname jėga? Koks yra šis dydis – skaliarinis ar vektorinis?

2. Ar galima, remiantis formule $F = ma$, teigti, kad kūną veikianti jėga priklauso nuo kūno masės ir jo pagreičio?

3. Kūnas juda apskritimu tolygiai, todėl jo pagreitis – normalinis. Kokia kūną veikiančios jėgos kryptis?

4. Bėgikai teigia, kad po starto lengviau įsibėgėja mažesnės masės sportininkas, o geriau finišuoja masyvesnis bėgikas. Ar šią mintį galima pagrįsti fizikos dėsniais?

5. Kokia jėga Žemė traukia 1 kg masės kūną?

6. Automobilis pradeda važiuoti horizontaliu keliu ir per 10 s pasiekia 25 m/s greitį. Automobilio masė 1600 kg. Kokia yra automobilio variklio traukos jėga? Pasipriešinimo judėjimo nepaisykite.

7. Kokį kelią nuvažiuos automobilis, veikiamas 4 kN traukos jėgos, kol įgis 90 km/h greitį? Automobilio masė 1600 kg. Į pasipriešinimą judėjimui neatsižvelkite.

8. Kaip susijusios kūnų masės su pagreičiais, kuriuos tie kūnai įgyja sąveikaudami?

9. Uždenkite tuščią puoduką kartono gabalėliu, o ant jo padėkite monetą. Staiga patraukite kartono dangtelį taip, kad moneta liktų savo vietoje ir įkristų į puoduką. Pasinaudodami ta pačia kūnų savybe, iliuzionistai sugeba ištraukti staltiesę, o visi indai lieka stovėti ant stalo. Kokia toji kūnų savybė?

10. Du rutuliukai juda vienas prieš kitą 2 m/s ir 3 m/s greičiu. Susidūrę jie atšoka judėdami: pirmasis – 4 m/s greičiu, o antrasis – 1 m/s greičiu. Kam lygi pirmojo rutuliuko masė, kai antrojo masė yra 0,3 kg?

11. Garvežys pastūmė horizontaliame kelio ruože stovintį vagoną, kurio masė 30 t. Vagonas pradėjo judėti 0,5 m/s greičiu. Raskite smūgio jėgą, jei smūgis truko 1 s?

12. 1 km atstumu nuo stoties traukinio greitis lygus 10 m/s. Toliau traukinys juda tolygiai greitėdamas. Kokiu atstumu nuo stoties bus traukinys po 2 min, kai jėga, kuri jam suteikia pagreitį, lygi 25 kN, o traukinio masė 500 t?

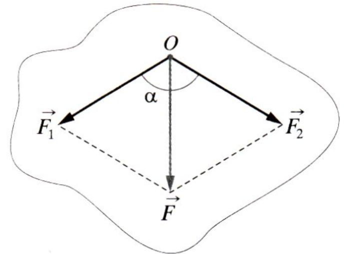
13. Jėgų sudėtis. Sunkio centras

27 lygtis yra svarbiausia dinamikos lygtis, kurioje jėga $\vec{F}$ lygi visų kūną veikiančių jėgų sumai: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n$.

Jėga, kuri kūną veikia taip pat, kaip ir kelios jėgos kartu paėmus, vadinama atstojamąja jėgà. Vadinasi, $\vec{F}$ – kūną veikiančių jėgų *atstojamóji*. Kadangi jėgos yra vektoriniai dydžiai, tai jų atstojamajai apskaičiuoti taikomos vektorių sudėties taisyklės.

Atstojamosios jėgos apskaičiavimui fizikoje naudojami keli būdai.

• Jėgos $\vec{F}_1$ ir $\vec{F}_2$ veikia tą patį kūno tašką, tarpusavyje sudarydamos kampą α ($180^0 \geq \alpha \geq 0^0$), (23 pav.).



23 pav.

Iš 22 paveikslo matome, kad jėgų atstojamoji $\vec{F}$ yra nukreipta lygiagretainio, kurio kraštinės yra vektoriai $\vec{F}_1$ ir $\vec{F}_2$, įstrižainės kryptimi, o modulis apskaičiuojamas pagal kosinuso teoremą:

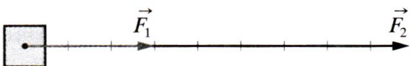
$$F^2 = F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos\alpha. \qquad (28)$$

Šios formulės ribiniai atvejai yra:

a) kai kūną veikiančios jėgos $\vec{F}_1$ ir $\vec{F}_2$ yra lygiagrečios ($\alpha = 0^0$) ir veikia viena kryptimi, tai

$F = F_1 + F_2$ (jėgos veikia viena kryptimi, o jų atstojamoji lygi jėgų didumų sumai ir nukreipta ta pačia kryptimi, 24 pav., *a*);

b) kai $\alpha = 180^0$, tai atstojamosios jėgos didumas apskaičiuojamas taip: $F = F_1 - F_2$ (jėgos veikia priešingomis kryptimis, o jų atstojamoji lygi tų jėgų skirtumui ir nukreipta didesnės jėgos kryptimi, 24 pav., *b*).





a





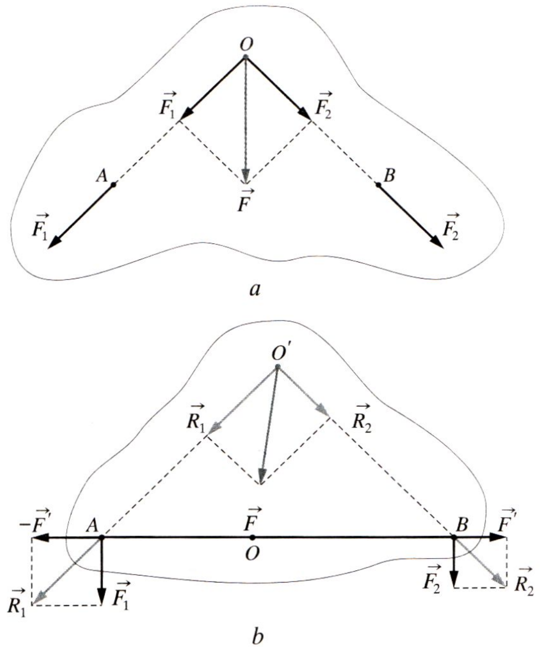
b

24 pav.

• Jėgos $\vec{F}_1$ ir $\vec{F}_2$ veikia skirtingus kūno taškus A ir B, o jų kryptys – yra neprasilenkiančios tiesės, t. y. jėgų vektoriai guli vienoje plokštumoje ir tik pratęsti susikerta taške O (25 pav., *a*).

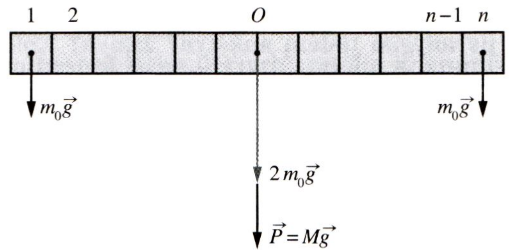
Jėgų atstojamąją randame perkėlę jėgas $\vec{F}_1$ ir $\vec{F}_2$ išilgai jėgų veikimo krypties iki susikirtimo taško O ir sudėję taip, kaip yra nurodyta ankstesniame atvejyje (28).

• Jėgos $\vec{F}_1$ ir $\vec{F}_2$ yra lygiagrečios (25 pav., *b*). Jų atstojamoji lygi tų jėgų modulių sumai $F_1 + F_2$ ir veikia į tašką, dalijantį atkarpą AB tarp jėgų veikimo taškų į dalis AO ir OB, atvirkščiai proporcingas tuos atstumus atitinkančioms jėgoms: $\frac{AO}{OB} = \frac{F_2}{F_1}$.



25 pav.

Prieš atlikdami jėgų $\vec{F}_1$ ir $\vec{F}_2$, veikiančių taškus A ir B, sudėtį, tiesės AB linijoje prie kūno pridedame $\vec{F}'$ ir $-\vec{F}'$, dvi vieną kitą kompensuojančias jėgas. Sudėję $\vec{F}_1$ su $-\vec{F}'$ bei $\vec{F}_2$ su $\vec{F}'$, gauname jėgas $\vec{R}_1$ ir $\vec{R}_2$, kurių atstojamoji visiškai nesiskiria nuo jėgų $\vec{F}_1$ ir $\vec{F}_2$ atstojamosios. R_1 ir R_2 sudedame taip, kaip aprašyta anksčiau (25 pav., *a*).



26 pav.

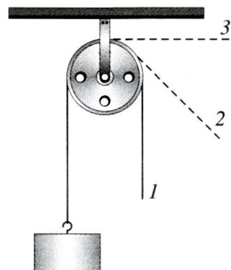
Yra atvejų, kai kūną veikiančių kelių jėgų viena jėga (atstojamoji) negalės pakeisti. Tai būna tada, kai tos jėgos yra prasilenkiančiose tiesėse arba jėgų veikimo kryptys yra priešingų krypčių (susidaro jėgų pora). Tada kūnas atlieka sudėtingą judėjimą.

Svarbus lygiagrečių jėgų sudėties pavyzdys yra kūno masės centro radimas, kuris parodytas 26 paveiksle. Iš pradžių M masės kūną išskaidome į labai didelį skaičių n nykstamai mažų masių m_0 ($M = nm_0$), kurios yra veikiamos sunkio jėgų $m_0\vec{g}$. Sudėję dviejų kraštinių kūnelių 1 ir n lygiagrečiai žemyn nukreiptas sunkio jėgas $m_0\vec{g}$, gauname atstojamąją $2m_0\vec{g}$, o jos veikimo taškas O yra strypo centre, nes sudedamos jėgos yra lygios. Pridėję dar kitas dvi kūnelių 2 ir $(n-1)$ sunkio jėgas, gautume atstojamąją $4m_0\vec{g}$, ir t. t. Tęsdami jėgų $m_0\vec{g}$ sudėtį, rastumėme, kad visų sunkio jėgų atstojamoji yra $(m_0\vec{g} + m_0\vec{g} + ...) = n\, m_0\vec{g} = M\vec{g}$, o gautos jėgos $M\vec{g}$ veikimo taškas yra O. **Tašką, į kurį veikia visų lygiagrečių sunkio jėgų atstojamoji ir kurio padėtis nekinta kūnui bet kaip judant, vadiname masės centru.**

Sudarius jėgą (atramos reakcijos), kurios kryptis priešinga atstojamosios $M\vec{g}$ krypčiai ir kuri veikia į tašką O, kūnas išliks pusiausviras. Remiantis šiomis žiniomis, galima lengvai rasti bet kurios formos kūno masės centro padėtį.

Bet kuri jėga, veikianti į masės centrą, priverčia kūną judėti lygiagrečiai pačiam sau, todėl, dinamiškai nagrinėjant slenkamąjį kūnų judėjimą ir žymint visų kūną veikiančių jėgų veikimo tašką, įprasta laikyti jį masės centru.

Klausimai ir užduotys



1. Ar gali žmogaus masės centras atsidurti už kūno ribų? Ar įmanoma šuolininkui į aukštį peršokti kartelę taip, kad jo masės centras praeitų žemiau kartelės?

2. Tą patį kūno tašką veikia dvi viena kitai statmenos jėgos. Viena jų yra 45 N didumo. Kokio didumo yra antroji jėga, jeigu jų atstojamoji lygi 75 N?

3. Kūnas kabo ant siūlo, permesto per nejudamą skridinį taip, kaip parodyta brėžinyje. Ar vienoda jėga įtempia siūlą, kai jo padėtys yra *1*, *2* ir *3*? Ar vienoda jėga tais atvejais veikia skridinio ašį?

4. 1000 N svorio kūnas yra ant nuožulniosios plokštumos, kurios aukštis 15 m, o ilgis 25 m. Kokia jėga reikia veikti tą kūną lygiagrečiai nuožulniajai plokštumai, kad jis tolygiai judėtų aukštyn? žemyn? Kokia jėga tada kūnas veiks nuožulniąją plokštumą? Trinties nepaisykite.

5. Du buksyriniai garlaiviai tolygiai traukia laivą trosais, tarp kurių yra 60° kampas. Kokia jėga priešinasi laivo judėjimui, jeigu abu trosai įtempti vienoda jėga, lygia $2 \cdot 10^4$ N?

6. Parenkite referatą tema „Matematika – fizikos kalba“.

14. Trečiasis Niutono dėsnis. Niutono dėsnių reikšmė

Sakydamas, kad „irklas su vandeniu daro tą patį, ką ir vanduo su irklu“, šio dėsnio esmę suvokė Leonardas da Vinčis XV a., tačiau I. Niutonas, įvedęs jėgos sąvoką, užbaigė tos minties formulavimą: **„Jėgos, kuriomis materialieji taškai veikia vienas kitą, visada yra vienodo didumo ir priešingų krypčių išilgai tiesės, jungiančios šiuos materialiuosius taškus“**, t. y.

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \qquad (29)$$

Šiam teiginiui patvirtinti padarykime tokį bandymą: sukabinkime dviejų dinamometrų kabliukus ir, užkabinę vieno dinamometro žiedą už kablio, įkalto į sieną, tempkime už antrojo dinamometro žiedo. Abu dinamometrai rodys tą patį. Tai reiškia, kad **jėgos visada atsiranda poromis**. Sąveikos metu atsiradusias jėgas pavadinkime *veĩksmo ir atóveikio jėgomìs* (kurią jėgą vadinti veiksmu ir kurią atoveikiu,

susitariame kiekvienu konkrečiu atveju). Pavyzdžiui, stalą veikiantį rankos spaudimą $\vec{F}_1$ patogu vadinti veiksmu, o ranką veikiantį stalo spaudimą $\vec{F}_2$ – atoveikiu. Tada trečiąjį Niutono dėsnį galima suformuluoti paprasčiau: **veĩksmas ir atóveikis visada yra vienodo didumo, bet priešingų krypčių**.

Veiksmo ir atoveikio jėgos veikia skirtingus kūnus, todėl viena kitos atsverti negali, nors jos yra vienodos prigimties (tamprumo, gravitacijos ir t. t.). Pavyzdžiui, jeigu arklys traukia vežimą, tai nereiškia, kad arklio traukos jėga yra didesnė, negu ta jėga, kuria vežimas traukia arklį. Esmė yra tame, kad arklio jėga (veiksmas) veikia judrų vežimą ir jos pakanka riedėjimo trinčiai tarp vežimo ratų ir žemės nugalėti. Tuo tarpu vežimo atoveikis veikia arklį, o tarp jo pasagų ir žemės paviršiaus gali susidaryti daug didesnės trinties jėgos.

Jeigu veiksmas ir atoveikis, kuriuos apibūdina trečiasis Niutono dėsnis, atsvertų vienas kitą, nebūtų galima išjudinti nė vieno kūno.

Remiantis trečiuoju Niutono dėsniu, dviejų jėgų moduliai kiekvienu laiko momentu yra lygūs nepriklausomai nuo dalelių judėjimo. Taip gali būti tik tada, jei sąveika perduodama be galo dideliu greičiu. Manoma, kad niekas negali viršyti šviesos greičio. Todėl Niutono dėsnių galiojimas yra ribotas. Tačiau, kūnui judant nedideliais greičiais, kurie yra daug kartų mažesni už šviesos greitį, Niutono dėsniai galioja labai tiksliai.

Trečiasis Niutono dėsnis taikomas technikoje, pvz., vienas iš šio dėsnio pasireiškimo pavyzdžių – atatranka šūvio metu – naudojama ginklams (pistoletams, kulkosvaidžiams ir kt.) automatiškai užtaisyti.

Apibendrinant Niutono dėsnius, galima nesunkiai paaiškinti, kodėl ir kokiomis sąlygomis kūnai juda tiesiai ir tolygiai, kokių sąlygų reikia norint išlaikyti rimties būseną arba dalyvauti kintamajame judėjime. Jeigu kūnas juda tiesiai ir tolygiai ar yra rimtyje, tai jo neveikia jokios jėgos arba tų jėgų atstojamoji lygi nuliui. **Kūnas (materialusis taškas), esantis rimtyje arba judantis tiesiai ir tolygiai, vadinamas pusiáusviru.** Kad kūnas (materialusis taškas) būtų pusiausviras, jį veikiančių jėgų suma turi būti lygi nuliui.

Žinome, jog dažniausiai sutinkamas kūnų judėjimas – pastoviu pagreičiu – yra tolygiai kintamas judėjimas. Antrasis Niutono dėsnis, aiškindamas tokią judėjimo rūšį, nurodo, kad šitaip judantį kūną ar materialųjį tašką veikianti jėga ar veikiančių jėgų atstojamoji $\vec{F}$ turi būti pastovi (turi būti pastovus jėgos modulis ir kryptis).

Apskritimu judančio kūno pagreitis yra normalinis (žr. §10), t. y. visuose trajektorijos taškuose jo modulis vienodas ir lygus $\frac{v^2}{r}$. Tokį kūną veikianti jėga irgi nukreipta į apskritimo centrą, kuriuo juda nagrinėjamas kūnas. Ji vadinama *centrinė, arba įcentrinė, jėgà*, o jos modulis yra pastovus ir lygus

$$F_{\text{įc}} = \frac{mv^2}{r}. \tag{30}$$

Iš trečiojo Niutono dėsnio sužinome, kad **jėga atsiranda kūnams sąveikaujant**. Kiekvieną sąveikaujantį su kitais kūną veikia jėga, dėl kurios kūnas įgyja pagreitį. Remiantis Niutono dėsniais, galima teigti, kad **jėga nulemia pagreitį, bet ne greitį**,

o tai reiškia, kad **jėga yra** ne judėjimo, bet **judėjimo kitimo (t. y. greičio kitimo) priežastis.** Suprantama, judėjimui jokios priežasties nereikia. Tai patvirtina ir pirmasis Niutono dėsnis, pagal kurį kūnas juda tiesiai ir tolygiai net neveikiamas jokių jėgų. Tačiau judėjimas gali pasikeisti tik paveikus jėgai. Todėl neveikiamas jėgos kūnas negali judėti kreive (apskritimu), nes taip judant nuolat kinta judančio kūno greičio vektoriaus kryptis.

Iš 26 formulės nesunku suvokti, kad pagreičio kryptis visuomet sutampa su jėgos kryptimi. Tuo tarpu greičio vektoriaus krypčiai tai nėra būdinga. Judančio kūno greičio ir jį veikiančios jėgos kryptys gali sutapti, pvz., kai kūnas laisvai krinta, arba būti priešingų krypčių, pvz., kai kūnas metamas vertikaliai aukštyn. Kai greičio kryptis yra statmena jėgos krypčiai, kūnas juda apskritimu.

Sužinojome, kad pirmasis Niutono dėsnis galioja tik inercinėse atskaitos sistemose, kurių yra be galo daug.

Pakeitus vieną inercinę atskaitos sistemą kita, kūno masė ir tą kūną veikianti jėga nekinta. Vadinasi, ir kūno pagreitis nepriklauso nuo pasirinktos atskaitos sistemos. Kadangi Niutono dėsniai apibūdina ir išreiškia matematinę priklausomybę tarp jėgos, kūno masės ir jo judėjimo pagreičio, todėl galime daryti išvadą, kad **mechaninio judėjimo dėsniai yra vienodi visose inercinėse atskaitos sistemose.** Šį teiginį vadiname Galilėjaus reliatyvumo principu. Pasak jo, visose inercinėse atskaitos sistemose visi mechaniniai procesai, esant vienodoms pradinėms sąlygoms, vyksta vienodai. Pereinant nuo vienos inercinės atskaitos sistemos prie kitos, gali keistis kūno greitis, jo poslinkis ir trajektorija, tačiau judėjimo dėsniai išlieka tokie patys.

Klausimai ir užduotys

1. Ar sąveikaujant dviems kūnams atsirandančios jėgos kompensuoja viena kitą?

2. Prieš prasidedant raketų skrydžiams už Žemės ribų, kai kurie žmonės manė, kad raketa niekada negalės nuskrieti į Mėnulį ar Marsą, nes už Žemės atmosferos ribų nėra oro, į kurį galėtų „atsispirti" raketa. Kas varo raketą į priekį, jai greitėjant beorėje tarpplanetinėje erdvėje?

3. Sunkvežimis susidūrė su motociklu. Pagal trečiąjį Niutono dėsnį susidūrimo metu jie veikė vienas kitą vienodo didumo jėgomis. Kodėl tokios nevienodos avarijos pasekmės: motociklas buvo nublokštas toli į šalikelę, o automašina liko ant kelio?

4. Du rutuliai, kurių masės 200 g ir 300 g, pakabinti ant siūlų. Jie atlenkiami ir paleidžiami. Vidutinė smūgio jėga 6 N. Nustatykite, kokius pagreičius įgyja rutuliai smūgio metu.

5. Berniukas, stovėdamas 200 kg masės valtyje, 125 N jėga tempia lyną, kuris pritvirtintas ant krante esančio kuolo. Kokiu pagreičiu juda valtis, jei berniuko masė 50 kg?

6. Ant žemės guli 1 kg masės akmuo. Kokia jėga jis traukia į save Žemę? Šią jėgą pavaizduokite brėžinyje.

7. Ant stalo padėti 5 kg ir 3 kg masės tašeliai, tarpusavyje sujungti siūlu. Kokia jėga siūlas veikia antrąjį tašelį, jei judėjimo kryptimi 5 kg masės tašelis yra veikiamas 40 N jėga?

3 SKYRIUS. JĖGOS GAMTOJE. JĖGŲ DĖSNIAI

Gamtoje šiuo metu žinomos keturių rūšių fundamentalios sąveikos: *gravitãcinė, elektromagnètinė, stiprióji (branduolìnė) ir silpnóji*. Mechanikoje, nagrinėjant didelių kūnų judėjimą, susiduriama su gravitacijos, tamprumo ir trinties jėgomis (pastarosios dvi yra elektromagnetinės kilmės). Gravitãcijos jėgos viena iš dedamųjų ties Žemės paviršiumi vadinama *sunkiù*, o kūno poveikį į atramą apibūdina *kū̃no svõris* – elektromagnetinės kilmės jėga. Aptarsime dėsnius, kurie atrasti nagrinėjant mechaninius reiškinius ir juose pasireiškiančias jėgas.

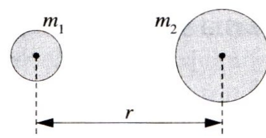
15. Visuotinės traukos (gravitacijos) dėsnis. Gravitacijos jėga

Nuo pat vaikystės kiekvienas iš mūsų stebime gravitacijos jėgos veikimą, nes matome, kaip žemyn krinta akmenys, nuo kalnų teka upės ir t. t. Ši jėga – unikali, kadangi ji veikia tarp visų gamtos kūnų, nesvarbu, kokios masės jie yra: ar tai elementariosios dalelės, turinčios nykstamai mažą masę, ar gigantiškos masės – galaktikos. Gravitacijos jėga apskaičiuojama pagal dėsnį, kurį atrado I. Niutonas (1643–1727 m.), ieškodamas būdų, kaip paaiškinti Keplerio dėsningumus apie planetų judėjimą.

1682 m. I. Niutono suformuluotas visuotinės traukos (gravitacijos) dėsnis teigia, kad **du kūnai (materialieji taškai), kurių masės m_1 ir m_2, veikia vienas kitą jėga, tiesiogiai proporcinga jų masių sandaugai ir atvirkščiai proporcinga atstumo tarp masių centrų kvadratui.** Matematiškai šis dėsnis užrašomas taip:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}; \qquad (31)$$

čia F – gravitacijos jėga; G – **gravitãcijos konstánta, skaitiniu didumu lygi jėgai, veikiančiai tarp dviejų vienodos masės kūnų, kai atstumas tarp jų 1 m;** m_1 ir m_2 – sąveikaujančių kūnų masės; r – atstumas tarp kūnų centrų (27 pav.).



27 pav.

Jeigu traukos jėga veikia tarp Žemės rutulio ir kreidos gabalėlio, tai tikriausiai ji veikia ir tarp pusės Žemės rutulio ir kreidos gabalėlio. Mintyse toliau šitaip dalydami Žemės rutulį, prieisime išvadą, kad gravitacijos jėgos turi veikti tarp bet kurių kūnų, pradedant žvaigždėmis ir baigiant molekulėmis, atomais bei elementariosiomis dalelėmis. Šią prielaidą 1788 m. eksperimentais patvirtino anglų fizikas Henris Kavendišas (1731–1810).

Kavendišas atliko bandymus nedidelių kūnų gravitacinei sąveikai nustatyti sukamosiomis svarstyklėmis. Ant plonos varinės vielos jis pakabino maždaug 2 m ilgio strypą, o prie jo pritvirtino du vienodus švininius rutuliukus, kurių skersmuo apytiksliai lygus 5 cm. Prieš tuos rutuliukus jis pastatė didelius švininius 20 cm skersmens rutulius. Bandymai parodė, kad strypas su mažais rutuliukais

pasisuko. Iš tokių stebėjimų galime daryti išvadą, kad tarp švininių rutulių veikia traukos jėga.

Strypui pasisukti trukdo tamprumo jėga, kuri atsiranda dėl pakabos susisukimo. Ši jėga proporcinga posūkio kampui. Pagal pakabos posūkio kampą galima apskaičiuoti rutulių gravitacinės sąveikos jėgą.

Kavendišo bandymuose naudojamų rutulių mases m_1 ir m_2 bei atstumą tarp jų r buvo nesunku išmatuoti. Gravitacinės sąveikos jėgą F išmatavo bandymo metu, todėl buvo galima nustatyti visuotinės traukos dėsnio gravitacijos konstantą G. Naujausių tyrimų duomenimis, ji lygi:

$$G = 6{,}6720 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N\ m^2/kg^2} \approx 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N\ m^2/kg^2}.$$

Savo bandymą H. Kavendišas pavadino „Žemės svėrimu“. Iš tikrųjų ties Žemės paviršiumi kūną veikianti traukos jėga užrašoma taip: $F = G\frac{mM_{\check{z}}}{R_{\check{z}}^2}$, čia m – kūno masė; $M_{\check{z}}$ – Žemės masė; $R_{\check{z}}$ – Žemės spindulys. Ši jėga suteikia kūnui pagreitį $\vec{g}$, vadinamą *láisvojo kritìmo pãgreičiu*, kurį galima gana nesunkiai išmatuoti arba apskaičiuoti. Remiantis antruoju Niutono dėsniu, galima užrašyti, kad $mg = G\frac{mM_{\check{z}}}{R_{\check{z}}^2}$.

Šioje lygtyje suprastinę kūnų mases m (šios masės pažymėtos ta pačia raide, tačiau jų fizikinė prasmė yra skirtinga, kadangi viena išreiškia kūno gravitacines, o kita – inercines savybes; beje, skaitmeniško skirtumo tarp jų iki šiol nerasta), gauname:

$$g = G\frac{M_{\check{z}}}{R_{\check{z}}^2}. \qquad (32)$$

Iš pastarosios lygties akivaizdu, jog *laisvojo kritimo pagreitis g nepriklauso nuo kūno masės*, o tik nuo Žemės charakteristikų. Vadinasi, **visi Žemėje esantys kūnai krinta vienodu pagreičiu**, kaip ir buvo nustatęs Galilėjus.

Į 32 formulę įrašius jau žinomų dydžių (G, $R_{\check{z}}$ ir g) reikšmes, galima apskaičiuoti Žemės masę $M_{\check{z}}$:

$$M_{\check{z}} = 5{,}9742 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg} = 5{,}9742 \cdot 10^{21}\ \mathrm{t}.$$

Sunku net įsivaizduoti, kokį milžinišką šuolį pasaulio pažinime atliko visuotinės Žemės traukos dėsnio atradimas. Pirmiausia buvo įrodyta, kad danguje, kaip ir Žemėje, veikia tos pačios jėgos. Antra, paaiškėjo stulbinančiai paprastas dangaus mechanikos principas – nebereikėjo jokių dvasių, angelų ar sūkurių, stumdančių planetas besisukančiose dangaus sferose... Paaiškėjo, kad *visą sudėtingą dangaus kūnų judėjimą, kaip ir kūnų kritimą Žemėje, valdo viena fundamentinė jėga, vadinama gravitacijos jėga*. Jos itin paprastoje matematinėje išraiškoje glūdi milžiniška dangaus ir Žemės reiškinių įvairovė.

Buvo pasiūlyti įvairūs būdai planetų judėjimo orbitoms apskaičiuoti atsižvelgiant ne vien į Saulės trauką, bet ir į kitų planetų poveikį (nors apskritai trijų sąveikaujančių kūnų problema matematiniu požiūriu nėra išspręsta ligi šiol).

Atradus visuotinę trauką, buvo įrodytas Saulės sistemos stabilumas, o svarbiausia tai, jog buvo nustatyta planetų, jų palydovų, kometų ir kitų dangaus kūnų padėtis ne tik šimtams metų į priekį, bet ir apskaičiuotas jų judėjimo pobūdis prieš daugelį tūkstančių metų. Didžiausias dangaus mechanikos triumfas – Halio kometos grįžimo numatymas ir naujos Urano planetos atradimas iš anksto apskaičiuotoje vietoje.

Vėlesni žvaigždžių stebėjimai parodė, kad gravitacija veikia ne tik Saulės sistemos viduje, bet ir tarp žvaigždžių: kai kurios artimos žvaigždės sudaro dvinares ar net trinares sistemas ir, tarpusavio traukos veikiamos, sukasi viena apie kitą. Žvaigždės jungiasi į milžiniškus sambūrius – galaktikas (sudarytas iš milijardų žvaigždžių), kurias irgi jungia visuotinė trauka. Savo ruožtu galaktikos grupuojasi į galaktikų spiečius.

Kita vertus, traukos jėga turi veikti ir tarp mus supančių kūnų, vadinasi, mus turi traukti kalnas ar net kitas žmogus. Kadangi gravitacijos konstanta yra labai maža, tai mes tos traukos nejaučiame (nors ją galime įvertinti jautriais prietaisais). Vadinasi, tik dideli kosminiai kūnai sukuria galingas traukos jėgas.

Tolstant sąveikaujantiems kūnams, jų tarpusavio traukos jėga mažėja proporcingai atstumo kvadratui ir, esant dideliems atstumams, tarsi turėtų išnykti. Iš fizikos kurso gerai žinome, kad paviršiaus apšvieta statmenais spinduliais (žr. § 113), analogiškai visuotinės traukos dėsniui, mažėja šviesos šaltiniui tolstant nuo apšviečiamo kūno. Nežiūrint šių dėsningumų, mes pakankamai gerai matome tolimas žvaigždes bei galaktikas. Vadinasi, Saulės ir net Žemės trauka juntama visoje Visatoje.

Gravitacijos teorija padėjo suprasti ir dangaus kūnų evoliuciją. P. Laplasas (*Laplace*) pasiūlė žvaigždžių bei jų grupių susidarymo iš dujų ir dulkių debesies hipotezę, pagal kurią įvairios dalelės dėl tarpusavio traukos jungiasi į vieną ar kelis branduolius, kuriuose, medžiagai toliau traukiantis (susislegiant), prasideda degimo reakcija ar net sprogimas. Šios teorijos dėka Laplasas bandė paaiškinti Saulės sistemos planetų, jų palydovų ir kometų susidarymą.

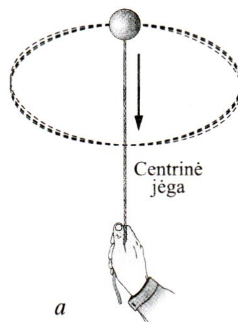
Gravitacija paaiškina ir sferinę dangaus kūnų formą – tai traukos jėgos, nukreiptos į kūno centrą, padarinys. Dėl netolygaus masės pasiskirstymo besisukančioje žvaigždėje ar planetoje kūnai šiek tiek susiploja.

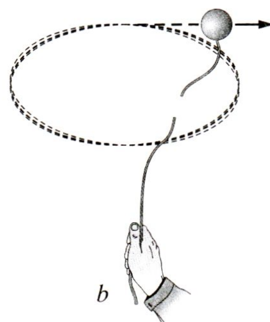
Atlikdami vis tikslesnius Saulės sistemos stebėjimus, astronomai nustatė ir nukrypimų nuo šio dėsnio. Vienas jų – tai artimiausios Saulei planetos Merkurijaus judėjimas orbita skriejant šiek tiek greičiau, negu tai turėtų būti dėl kitų planetų poveikio.

Kaip įrodė A. Einšteinas, I. Niutono dėsniai turi galiojimo ribas ir arti didelės masės kūnų jie jau nėra tikslūs (kaip tik Merkurijus patiria stipriausią Saulės poveikį). Niutono teorijos netikslumams išvengti A. Einšteinas sukūrė bendresnę gravitacijos teoriją – bendrąją reliatyvumo teoriją, su kuria susipažinsime vėliau.

Kadangi pagreitį, kurį suteikia kūnui Žemės traukos jėga, pavadinome laisvojo kritimo pagreičiu g, tai gravitacijos jėgą planetų paviršiuje arba laisvai krintančiam bei gulinčiam ant to paviršiaus kūnui užrašome ne $F = G\frac{mM_ž}{R_ž^2}$, o

$$\vec{F} = m\vec{g} \tag{33}$$





28 pav.

ir ją vadiname *sunkiù* (nors rimtyje esančio kūno sunkis yra tik visuotinės traukos jėgos dedamoji). Gravitacijos jėgą, užrašytą 33 formule, galima išskaidyti į dvi dedamąsias, iš kurių viena yra sunkis $\vec{F}$, o kita – $F_1 = \frac{mv^2}{r}$ suteikia kūnui, judančiam kartu su Žeme, jai besisukant apie savo ašį, normalinį (statmenąjį) pagreitį (28 pav.).

Analogiškame Žemės sukimuisi pavyzdyje (28 pav., *a*) matome, kaip juda už virvutės pririštas kūnas, kai jį veikia centrinė jėga, o *b* dalyje pavaizduotas to paties kūno judėjimas virvutei nutrūkus.

Priklausomai nuo geografinės platumos, kurioje kūnas juda (Žemė yra geoido formos, todėl jos pusiaujo ir ašigalio spinduliai nėra lygūs), laisvojo kritimo pagreitis įvairiose platumose yra skirtingas – nuo 9,79 m/s^2 pusiaujyje iki 9,82 m/s^2 ašigaliuose.

Kūną, pakeltą į aukštį *h* virš Žemės paviršiaus, veikianti gravitacijos jėga sumažėja. Ji lygi:

$$F = G\frac{mM_ž}{(R_ž + h)^2}. \qquad (34)$$

Ši jėga gali priversti natūralius ir dirbtinius Žemės palydovus judėti normaliniu pagreičiu beveik apskritiminėmis (iš tikrųjų – elipsinėmis) orbitomis.

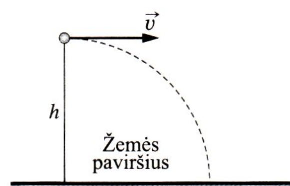
Apskaičiuokime, kokiu linijiniu greičiu turi skrieti aukštyje *h* esantis palydovas, kad išliktų apskritiminėje orbitoje apie Žemę. Normalinį pagreitį $a_{įc}$ (žr. § 10) ir palydovo judėjimo linijinį greitį v sieja lygtis $a_{įc} = \frac{v^2}{R_ž + h}$.

Iš antrojo Niutono dėsnio išplaukia, kad $a_{įc} = \frac{F}{m} = G\frac{mM_ž}{(R_ž + h)^2 m}$.

Kadangi kairiosios lygčių pusės yra lygios, tai pagal matematinius dėsningumus galima sulyginti ir jų dešiniąsias puses: $\frac{v}{R_ž + h} = G\frac{M_ž}{(R_ž + h)^2}$, o iš čia gauname:

$$v = \sqrt{G\frac{M_ž}{R_ž + h}}. \qquad (35)$$

Aukštyje *h* nuo Žemės paviršiaus judantis kūnas, įgijęs 35 formulėje nurodytą greitį v, aplink Žemę skries apskritimu (29 pav.). Toks kūnas vadinamas *dirbtiniù Žẽmės palydovù* (DŽP).



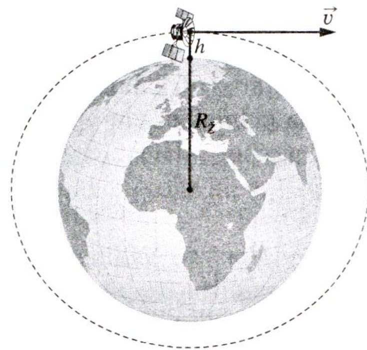
29 pav.

Kūnui judant aukštyje *h*, daug mažesniame už Žemės spindulį ($h \ll R_ž$), 35 lygtis įgauna tokį pavidalą:

$$v = \sqrt{G\frac{M_ž}{R_ž}} \text{ arba } v \approx \sqrt{gR_ž}. \qquad (36)$$

Į 36 lygtį įrašę jau žinomų dydžių vertes, gauname greičio skaitinę vertę:

$$v = 7900 \text{ m/s} = 7{,}9 \text{ km/s}.$$



30 pav.

Tai vadinamasis *pirmàsis kòsminis greĩtis*. Tokį mažiausią greitį lygiagrečiai Žemės paviršiui reikia suteikti kūnui, kad jis taptų dirbtiniu palydovu ir skrietų apskritimine orbita apie Žemę (30 pav.). Palei Žemę palydovai skraidyti negali, nes dėl trinties į orą sudegtų.

Kai materialiojo taško (kūno) greičių vertės yra nuo 7,9 km/s iki 11,1 km/s, tai jis juda aplink Žemę elipse ir, įgavęs liestinės kryptimi didesnį nei 11,2 km/s greitį, atitrūksta nuo Žemės traukos bei tampa mažu Saulės sistemos palydovu. Šis greitis v_2 = 11,2 km/s vadinamas *antrúoju kòsminiu greičiù*. Tokį greitį pasiekia šiuolaikinės raketos, skriejančios į kitas planetas.

Trečiàsis kòsminis greĩtis (v_3 = 16,6 km/s) suteikiamas šiuolaikinėms raketoms, startuojančioms iš Žemės, kad jos atitrūktų ne tik nuo Žemės, bet paliktų ir Saulės sistemą – skrietų į kitas galaktikas.

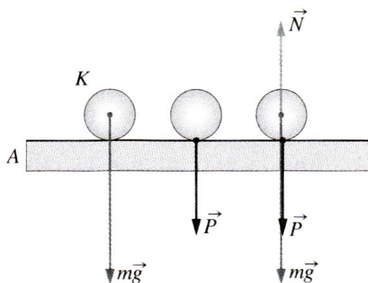
Palydovą į orbitą iškelia raketa nešėja, startuodama iš kosmodromo vertikaliai aukštyn gana nedideliu greičiu. Praskriejusi pro tankius atmosferos sluoksnius, pamažu įgauna horizontalią kryptį, suteikia palydovui atitinkamą greitį bei trajektoriją ir nuo jo atsiskiria. Palydovai skraido 300–1000 km aukštyje, nepriartėdami prie Žemės arčiau nei 150–160 km, kadangi tokiame aukštyje virš Žemės prasideda tanki atmosfera. Kiekvienas palydovas dėl trinties (nors ir į retą atmosferą) netenka dalies greičio, todėl po truputį leidžiasi žemyn ir sudega. Priklausomai nuo palydovų paskirties jų orbitos, sukimosi kryptys bei periodai ganėtinai skiriasi.

Pagal paskirtį DŽP skirstomi į mokslinio tyrimo, ryšių, meteorologinius, navigacinius, karinius ir t. t. Pačius sudėtingiausius mokslinius tyrimus atlieka erdvėlaiviai su kosmonautų įgulomis, o ryšių palydovai perduoda palydovines televizijos programas. Kai palydovas sukasi apie Žemę 35 000 km aukštyje, ties pusiauju jo periodas sutampa su Žemės sukimosi apie savo ašį periodu. Toks palydovas „kabo“ virš kažkurio vieno Žemės taško ir tarnauja pastoviems telefono, interneto ir kt. ryšiams palaikyti.

Navigaciniai palydovai skleidžia radijo signalus, pagal kuriuos laivai ir lėktuvai gali orientuotis erdvėje ir nustatyti savo buvimo koordinates. Navigaciniais palydovais šiandien naudojasi ir kai kurie automobiliai, turintys „elektroninį žemėlapį“. Jame esantis švytintis taškas rodo automobilio buvimo vietą. Gravitacijos jėgos buvimą dažniausiai aptinkame kaip sunkio ir kūno svorio poveikį kūnams. Tačiau sunkio, veikiančio kūną, nereikia painioti su kūno svoriu vien dėl to, kad skiriasi jų veikimo taškai: **kūno svoris – tai jėga *P*, veikianti horizontalią nejudančią kūno atžvilgiu atramą, o sunkis *mg* veikia kūną** (31 pav.). Be to, skiriasi ir šių jėgų prigimtis – **sunkis yra visuotinės traukos pasireiškimas, kūno svoris – elektro-**

magnetinės sąveikos pasireiškimas. Skaitiniu didumu jos gali smarkiai skirtis – tai priklauso nuo atramos arba pakabos judėjimo pobūdžio.

Sąveikaujant kūnui *K* ir atramai *A*, pagal trečiąjį Niutono dėsnį išlaikoma atramos poveikio į kūną jėgos $\vec{N}$ ir kūno poveikio į atramą jėgos $\vec{P}$ lygybė: $\vec{N}=-\vec{P}$. Vadinasi, norint rasti kūno svorį $\vec{P}$, užtenka apskaičiuoti atramos reakcijos jėgą $\vec{N}$. Jei atrama juda pagreičiu $\vec{a}$, kūno svoris apibūdinamas lygtimi



31 pav.

$$\vec{P}=m(\vec{g}-\vec{a}). \quad (37)$$

Priklausomai nuo atramos judėjimo krypties (pagreičio *a* krypties) kūno svoris gali būti:

1) $P = mg + ma$; atramai ir kūnui judant vertikaliai aukštyn tolygiai greitėjant, kūno svoris yra didesnis už sunkį.

2) $P = mg - ma$; kūnui su atrama leidžiantis vertikaliai žemyn, kūno svoris yra mažesnis už sunkį.

3) $P = 0$; tai nesvarumo būsena, kai kūnas su atrama juda žemyn pagreičiu, lygiu laisvojo kritimo pagreičiui ($a = g$).

4) $P = mg$; kai kūnas su atrama nejuda arba juda tolygiai, tai kūno svoris lygus sunkiui.

Jeigu jūs naudojatės liftu, esate pabuvoję žaidimo parko atrakcionuose arba keliavę automobiliu vingiuotais ir bent kiek kalnuotais Lietuvos keliais, tai tokį kūno svorio poveikį patyrėte ne vieną kartą. Pvz., liftui pradėjus kilti aukštyn, atrodo, tarsi jūsų kūnas būtų staiga pasunkėjęs. Ir, priešingai, jei liftas greitėdamas leidžiasi žemyn, tai susidaro malonus įspūdis, kad jūsų svoris sumažėjo. Panašiai jaučiamės ir sūpuoklėse, joms kylant arba leidžiantis. Jei lifte atsistotumėte ant svarstyklių, tai liftui pradėjus kilti jos rodytų didesnį svorį, negu jūs sveriate būdami rimtyje, o pradėjus leistis – mažesnį svorį.

Sunkis visiškai nepriklauso nei nuo judėjimo pobūdžio, nei nuo jokių kitų aplinkybių. Jus dar veikia ir lifto grindų reakcijos jėga, kuri neleidžia kristi žemyn. Liftui leidžiantis su pagreičiu žemyn, ta jėga sumažėja, nes jūs mažiau slegiate po kojomis su pagreičiu krintančias grindis. Liftui judant su pagreičiu aukštyn, ši jėga padidėja, nes ji ne tik atsveria jūsų svorį, bet ir suteikia jums kilimo pagreitį.

Jeigu jums lifte atliekant bandymus su svarstyklėmis, staiga nutrūktų liftą laikantys lynai (to Lietuvoje dar nėra buvę), o jūs neišsigąstumėte ir spėtumėte pažiūrėti, ką rodo svarstyklės, ant kurių stovite, tai pamatytumėte rodyklę ties nuline padala. Krintantis kūnas neslegia kartu su juo krintančios atramos – kūno svoris pasidaro lygus nuliui. Tokią nesvarumo būseną patiria parašiutininkai, todėl mes matome, kaip lengvai jie vartosi ir sklando uždelsto šuolio metu.

Užtat kosmonautai, besisukantys erdvėlaiviu aplink Žemę, gali džiaugtis nesvarumu, nors jis jiems ir įkyri (nėra malonu, kai bet koks nepritvirtintas daiktas

sklando bet kur; kai nei kavos, nei sriubos neįmanoma įpilti į atvirą indą – skystis burbulų pavidalu išplauks į kabiną; kai viršų nuo apačios galima atskirti tik pažvelgus pro iliuminatorių). Nesvarumas Žemės palydove susidaro ne dėl to, jog čia išnyksta planetos traukos jėga (palydovas nesisuktų aplink Žemę, jei tos traukos nebūtų), bet todėl, kad, sukdamasis aplink Žemę pastoviu greičiu, palydovas visą laiką krinta į ją ir kartu dėl inercijos juda tolyn (dėl tų dviejų judėjimų sudėties ir vyksta judėjimas apskritimu).

Tuo tarpu raketai kylant nuo Žemės su pagreičiu, kosmonauto svoris daug kartų padidėja – tos perkrovos žmogui labai nemalonios, o neretai ir pavojingos. Jos priklauso nuo kosmonauto padėties: kosmonautui gulint skersai judėjimo krypties, nieko bloga neatsitiks, jeigu jo pagreitis sekundės dalį net 20–30 kartų viršys laisvojo kritimo pagreitį *g*, o jam gulint išilgai raketos, svorio padidėjimas tik šešis kartus jau gali sukelti vadinamąją juodosios miglos būseną: žmogus laikinai netenka regėjimo ir net sąmonės.

Klausimai ir užduotys

1. Kaip pasikeis traukos tarp dviejų rutulių jėga, jeigu vieną jų pakeisime perpus mažesnės masės rutuliu?

2. Kaip pasikeis traukos tarp dviejų rutulių jėga, jeigu atstumas tarp jų padidės dvigubai?

3. Kodėl sunkio suteikiamas pagreitis nepriklauso nuo kūnų masės?

4. Ar kinta sunkis kūnui tolstant nuo Žemės paviršiaus? Atsakymą pagrįskite.

5. Kodėl fizikai teigia, kad masė yra bendresnis dydis negu svoris?

6. Raskite 1 kg masės kūno svorį ašigalyje ir pusiaujyje. Žemės spindulį laikykite lygiu 6400 km.

7. Apskaičiuokite 300 km aukštyje skriejančio Žemės palydovo apsisukimo periodą.

8. Kokiame aukštyje turi skrieti dirbtinis Žemės palydovas, kad jo apsisukimo periodas būtų lygus 24 h?

9. Kai kas mano, kad lakūnas, atliekantis „mirties kilpą“, turi būtinai prisirišti prie lėktuvo krėslo, kad iš jo neiškristų. Kas išlaiko lakūną krėsle, kai jis būna apsivertęs žemyn galva?

10. Ar vertikaliai aukštyn išmesto akmens kilimo laikas yra lygus jo kritimo žemyn laikui (į aplinkos pasipriešinimą neatsižvelkite)? Atsakymą pagrįskite.

11. Kur kasdieniame gyvenime mes patiriame nesvarumo būseną?

12. Ar kosmonautas užsigaus, atsitrenkęs į sieną palydovo kabinoje, kurioje yra susidaręs nesvarumas? Atsakymą pagrįskite.

13. Keltuvo kabina, kurios masė 300 kg, leidžiasi 0,80 m/s^2 pagreičiu. Kokia jėga įtempiamas kabiną laikantis lynas?

14. 8 t masės traktorius važiuoja 36 km/h greičiu iškilo tilto, kurio kreivumo spindulys 200 m, viduriu. Kokia jėga traktorius slegia tiltą?

15. Lėktuvas, baigdamas pikiruoti, skrenda 720 km/h greičiu lanku, kurio kreivumo spindulys 400 m. Kokia jėga tuo metu veikia 75 kg masės lakūną?

16. Tamprumo jėga. Huko dėsnis

Tamprùmo jėgos kūnuose atsiranda dėl tiesioginio kitų kūnų ar laukų poveikio į juos. Šį poveikį lydi tamprios deformãcijos (kūno formos pokyčiai). Deformuotame kūne atsiranda vidinės jėgos, nukreiptos priešinga kūno dalelių poslinkio krypčiai. Jos pasižymi gebėjimu atstatyti kūno formą praėjus išorinės jėgos poveikiui. Šios jėgos atsiranda dėl kūno atomų ar molekulių tarpusavio elektromagnetinės sąveikos kūno deformacijos metu. Kūną tempiant, atsiranda traukos jėgos, gniuždant – stūmos jėgos.

Jėga, kuri atsiranda deformuotame kūne ir yra nukreipta priešinga deformuojančios jėgos kyptimi, vadinama tamprùmo jėgà.

Panagrinėkime tempimo ir gniuždymo deformacijas. Veikiant išorinei jėgai $F_{iš}$ (32 pav., *a*), kūnas, kurio ilgis l_0, pailgėja dydžiu Δl: $\Delta l = l - l_0$.

Pagal Huko dėsnį, atsiradusi tamprumo jėga F_t, (žr. §52) yra proporcinga jo absoliučiajam pailgėjimui Δl (arba Δx). Iš čia išplaukia, kad

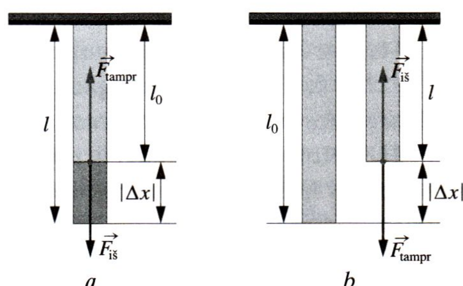
$$F_{tampr} = -k\Delta l, \qquad (38)$$

čia k – **tamprùmo koeficieñtas, kurio didumas lygus tamprumo jėgai, atsiradusiai deformuotame kūne, kai absoliutùsis pailgéjimas lygus vienetui** ($\Delta l = 1$). SI vienetų sistemoje jis matuojamas niutonais metrui: $[k]$ = N/m. Šis koeficientas priklauso nuo kūno matmenų, formos ir jį sudarančios medžiagos. **Absoliučiojo pailgėjimo santykis su kūno pradiniu ilgiu l_0 yra vadinamas santykiniù kū́no pailgéjimu** ir išreiškiamas lygtimi

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \qquad (39)$$

Žinome, kad visi kūnai sudaryti iš atomų arba molekulių, tarp kurių atstumai maži, kaip ir pačios dalelės. Sąveikaujant toms dalelėms tarpusavyje ir padidėjus atstumui tarp jų, atsiranda tarpusavio traukos jėga. Atstumui tarp dalelių sumažėjus, traukos jėgos virsta stūmos jėgomis. Todėl, strypą tempiant, atstumas tarp dalelių didėja, o gniuždant – mažėja (32 pav., *b*). Gniuždymo deformacijos metu atsiradusi tamprumo jėga yra priešingos krypties tempimo deformacijos atveju atsirandančiai jėgai, o absoliutusis ir santykinis pailgėjimas (technikoje vadinami *absoliučiąja ir santykine deformacijomis*) yra neigiami dydžiai. Gniuždomos pastatų atraminės kolonos, sienos ir pamatai, medžių kamienai, kojų kaulai ir kt.

Svarbu žinoti, kad tamprumo jėga visada yra nukreipta statmenai sąveikaujančių kūnų sąlyčio paviršiui. Sąveikaujant deformuotoms spyruoklėms, gniuždomiems arba tempiamiems strypams, lynams, siūlams, tamprumo jėga nukreipta išilgai jų ašių.



32 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Kokiomis sąlygomis atsiranda tamprumo jėgos?

2. Ką teigia Huko dėsnis?

3. Kuriomis sąlygomis kūnas deformuojasi?

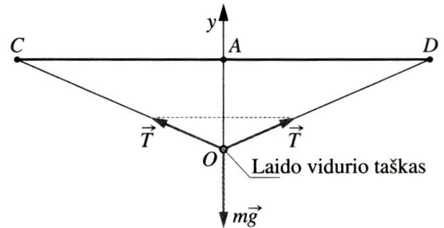
4. Kas yra atramos reakcijos jėga?

5. Kaip juda kūnas, kai jį veikianti tamprumo jėga nukreipta statmenai kūno judėjimui?

6. Prie siūlo pritvirtintas pasvaras juda apskritimu. Kokia jėga veikia pasvarą? Kokia jos kryptis?

7. Raskite standumą spyruoklės, kuri, veikiama 2 N jėgos, pailgėjo 4 cm.

8. Žmogus, kurio masė 60 kg, sukasi karusele 12 m spindulio apskritimu horizontalioje plokštumoje 10 m/s greičiu. Raskite žmogų veikiančios tamprumo jėgos vertę.



9. Troleibuso linijos kontaktinio laido įlinkis negali būti didesnis kaip 0,5 m. Kokia jėga tempia laidą, jeigu atstumas tarp taškų *C* ir *D* lygus 30 m, o laidas sveria 230 N?

17. Trinties jėga. Trinties jėgos veikiamo kūno judėjimas

Bet kokį judėjimą, išskyrus judėjimą tuštumoje, lydi pasipriešinimas. Šis pasipriešinimas atsiranda susilietus skirtingais greičiais judantiems kūnams jų sąlyčio vietoje. Parinkdami vietą sostinei prie Neries ir Vilnelės upių, lietuviai atsižvelgė į tai, kad šios jėgos mažesnės trinantis laivui ir vandeniui, o ne – vežimui ir žemei.

Trintiẽs jėgà vadiname elektromagnetinės kilmės jėgą, atsirandančią tarp besiliečiančių kūnų paviršių ir nukreiptą priešinga judėjimui kryptimi (33 pav.). Jos didumą sąlygoja besiliečiančių kūnų paviršių nelygumai, jų deformacijos ir sulipimas.

Yra trys (sausų paviršių) trinties jėgų rūšys: *rimtiẽs trintìs, slydìmo trintìs ir riedė́jimo trintìs*. Rimties trinties jėga neleidžia kūnams pajudėti iš vietos. Kūnas išjudinamas, kai jį veikianti išorinė jėga viršija tam tikrą rimties trinties vertę F_{tr0}. Rimties trinties jėgos modulis proporcingas normalinio slėgio jėgai:

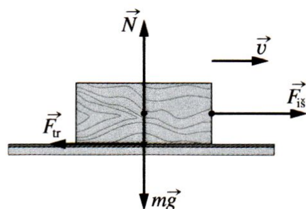
$$F_{tr0} = \mu N; \tag{40}$$

čia μ – rimties trinties koeficientas, kuris priklauso nuo besiliečiančių paviršių medžiagos, jų apdorojimo kokybės ir kitų faktorių.

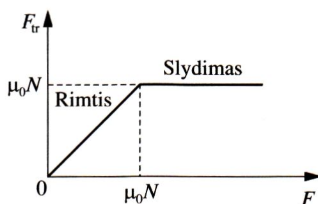
Trinties jėgos modulio priklausomybė nuo išorinės jėgos modulio parodyta 34 paveiksle.

Slydimo trinties jėgos modulis tiesiog proporcingas kūnų normalinio slėgio jėgos moduliui:

$$F_{slyd} = \mu_0 N. \tag{41}$$



33 pav.



34 pav.

Slydimo trinties koeficientas $\mu_0 < \mu$. Jis, kaip ir rimties trinties koeficientas, priklauso nuo tų pačių faktorių bei kūnų reliatyvaus judėjimo greičio.

Kai kūnas juda skystyje ar dujose, rimties trinties jėgos nėra, todėl plūduriuojantį kūną išjudinti galima silpna jėga. Trinties jėga skystyje ar dujose proporcinga kūno greičiui (kai greitis mažas) arba jo kvadratui (kai greitis didelis) ir priklauso nuo aplinkos savybių, kūno formos bei matmenų. Riedėjimo trinties jėga F_{ried} yra r kartų mažesnė už slydimo trinties jėgą (r – riedančio kūno spindulys). Bandymai rodo, kad riedėjimo trinties jėgos modulis tiesiogiai proporcingas kūnų slėgio jėgos moduliui ir atvirkščiai proporcingas riedančio kūno paviršiaus kreivumo spinduliui:

$$F_{ried} = \mu_r \frac{N}{r}. \tag{42}$$

Riedėjimo trinties koeficientas yra gerokai mažesnis už slydimo trinties koeficientą. Be to, trintį galima smarkiai sumažinti tarp besitrinančių paviršių įterpus skysčio sluoksnį.

Jau žiloje senovėje trinčiai sumažinti bei kūnų judėjimui vienas kito paviršiumi pagerinti žmogus sukūrė ratą. Šiandien jis mums tiek įprastas, jog nebekelia susižavėjimo ir nuostabos, kurių nusipelno. Tai vienas didžiausių senovės tautų išradimų, daug kartų sumažinantis judėjimo trintį. Ratas ritasi kelio paviršiumi beveik be šliaužimo, nes rato ir kelio lietimosi plotas yra nedidelis. Pagrindinė riedėjimo trinties priežastis – rato įspaudžiama nedidelė duobutė kelyje. Taigi ratas visą laiką rieda tarsi į mažytį kalniuką.

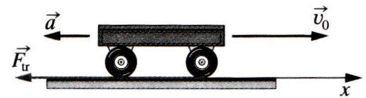
Rato atradimas nebuvo paprastas reiškinys – juk nei actekai, nei majai rato dar neturėjo, nors buvo išradę raštą ir gana tikslų kalendorių. Ko gera, tai buvo viena iš pagrindinių priežasčių, kodėl senosios Amerikos civilizacijos nepasiekė aukštesnio lygio.

Tolimas rato prototipas – riedantis rąstas. Senovės egiptiečiai jau mokėjo gabenti sunkius akmens blokus, pakišdami po jais apvalius rąstus – kitaip jie nebūtų pastatę didžiulių piramidžių ir šventyklų. Po kelių šimtmečių kažkokiam meistrui kilo geniali idėja: perpjauti rąstą į du ritinius, juos užmauti ant strypo, o pastarąjį pritvirtinti prie vežimo, kad rąsto nebereikėtų kaišioti po kroviniu ir kad jie judėtų kartu. Dar vėliau, išgalvojus ratlankį ir stipinus, ritinys virto ratu. XIX a. buvo sukonstruotas guolis – apie ašį besisukantys rutuliukai ar cilindrai. Tai – ratas rate. Nežiūrint ganėtinai senos rato išradimo istorijos, dar ir dabar vis tęsiasi bandymai patobulinti ratą.

Kadangi trinties jėgos kryptis yra priešinga judančio kūno reliatyviojo greičio krypčiai, tai ir pagreitis, kurį trinties jėga suteikia kūnui, nukreiptas į priešingą pusę negu greitis. Todėl trinties jėga mažina kūno greičio didumą, ir kūnas, veikiamas vien trinties jėgos, po tam tikro laiko sustoja.

Įsivaizduokime, kad prieš važiuojantį automobilį netikėtai atsirado kliūtis ir vairuotojas, išjungęs variklį, nuspaudė stabdį. Nuo stabdymo momento automobilį veikia tik trinties jėga, nes sunkio jėgą kompensuoja kelio paviršiaus reakcijos jėga (oro pasipriešinimo jėga maža). Praslinkus laiko tarpui Δt, nuvažiavęs atstumą s (stabdymo kelią), automobilis sustos. Apskaičiuokime laiką Δt, reikalingą automobiliui sustoti, ir stabdymo kelią s, kurį automobilis nuvažiuoja per tą laiką.

Trinties jėgos $\vec{F}_{tr}$ veikiamas automobilis važiuoja pagreičiu $\vec{a} = \frac{\vec{F}_{tr}}{m}$. Koordinačių ašį x parinkime taip, kad jos teigiamoji kryptis sutaptų su automobilio judėjimo kryptimi (35 pav.). Trinties jėga ir jos suteikiamas pagreitis $\vec{a}$ yra priešingos krypties negu x ašis, todėl šių vektorių projekcijos x ašyje yra neigiamos ir nuo pačių vektorių modulių skiriasi tik ženklu. Taigi $a_x = -a = -\frac{F_{tr}}{m}$. Bet $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$; čia v_x ir v_{0x} – galinio greičio $\vec{v}$ ir pradinio greičio $\vec{v}_0$ projekcijos x ašyje. Jos abi teigiamos, t. y. $v_x = v$; $v_{0x} = v_0$. Todėl $a_x = \frac{v - v_0}{t}$. Šiame pavyzdyje mus domina laikas Δt, kuris skaičiuojamas nuo automobilio stabdymo pradžios (kai jo greitis buvo v_0) iki pilno sustojimo (kai $v = 0$). Šiuo atveju $a_x = -\frac{v_0}{t}$ ir $a_x = -a$; todėl $\Delta t = -\frac{v_0}{a}$. Matematiškai pertvarkę lygtis, gauname lygtį, pagal kurią apskaičiuojame stabdymo laiką:



35 pav.

$$\Delta t = \frac{mv_0}{F_{tr}}. \quad (43)$$

Automobilio stabdymo kelias s lygus poslinkio vektoriaus $\vec{s}$, atitinkančio laiką t, projekcijai x ašyje. Ją galima apskaičiuoti pagal formulę $s = v_0 t - \frac{at^2}{2}$ arba $s = -\frac{v^2 - v_0^2}{2a}$. Šiuo atveju $a = \frac{F_{tr}}{m}$, o $v = 0$. Todėl stabdymo kelias (atstumas, kurį nuvažiuoja stabdomas kūnas iki pilno sustojimo) bus lygus:

$$s = \frac{mv_0^2}{2F_{tr}}. \quad (44)$$

Iš formulės matyti, kad stabdymo kelias proporcingas pradinio greičio kvadratui. Greitį padidinus du kartus, stabdymo kelias padidėja keturis kartus. Tai privalo įsidėmėti automobilių vairuotojai, traukinių mašinistai ir apskritai visi, kas valdo transporto priemones. Tai verta prisiminti ir pėstiesiems, pereinantiems judrią gatvę. **Judantiems kūnams sustoti reikia laiko ir erdvės.**

Perstatydami baldus ar traukdami sunkų karutį, skundžiamės trintimi, tačiau visai nesidžiaugtume, jei jos nebūtų, nes visi daiktai slystų iš rankų, vinys ir medvarščiai iššoktų iš savo vietų, lėkštės ar knygos slystų nuo stalų (juk jie visada šiek tiek pasvirę). Automobilis negalėtų pradėti važiuoti, o įsibėgėjęs – sustoti. Mes patys nepajėgtume ne tik vaikščioti, bet ir stovėti, nes tik sąnarių trintis mums leidžia stovėti išsitiesus.

Bet trintis tarp tų pačių sąnarių yra nepageidautina žmogui judant. Gamta labai išmoningai išsprendė šią problemą. Tarpas tarp kaulų galų yra užpildytas specialiu skysčiu – sąnarių tepalu, o kaulų galai baigiasi kremzlėmis. Žmogui stovint, kremzlės šiek tiek skysčio sugeria, trintis tarp sąnarių padidėja ir užtikrina kūno stabilumą. Žmogui pradėjus judėti, kremzlės vėl išskiria skystį, ir šis apsaugo sąnarius nuo trynimosi vienas į kitą.

Sekdamas gamta, žmogus išmoko kovoti su trintimi: pradėjo tepti besitrinančius paviršius alyva ir kitomis specialiomis medžiagomis.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname normalinio slėgio jėga? Ar būtinai ji yra sunkio jėga?

2. Suformuluokite trinties koeficiento apibrėžimą.

3. Kaip nukreiptas pagreitis, kurį kūnui suteikia trinties jėga?

4. Ar galima judėjimą, veikiant trinties jėgai, laikyti tolygiai kintamu?

5. Ar reikia suteikti aptakią formą kosminiams laivams, raketoms, kurios išveda juos į kosmosą? Atsakymą pagrįskite.

6. Paaiškinkite, kaip ir kodėl trintis tarp ratų ir kelio pasikeičia pradėjus lyti?

7. Trintį tarp besiliečiančių kūnų galima gerokai sumažinti šlifuojant jų paviršius. Vis dėlto tokiu būdu trintis ne artėja prie nulio, bet, priešingai, labai glotnūs paviršiai ima tarsi lipti vienas prie kito. Kodėl taip yra?

8. Nuo kurių fizikinių dydžių priklauso stabdymo kelias ir stabdymo laikas?

9. Stabdymo kelią galima sumažinti padidinant trinties jėgą arba sumažinant judėjimo greitį. Kuris šių būdų yra efektyvesnis?

10. Išjungus variklį, aerorogės, prieš sustodamos, nuvažiavo 250 m. Kokiu greičiu jos važiavo? (μ = 0,02.)

11. Automobilio vairuotojas, važiavęs 72 km/h greičiu, išjungė variklį ir staigiai ėmė stabdyti. Kiek laiko važiuos automobilis, kol sustos, kai trinties koeficientas lygus 0,60? Kokį stabdymo kelią nuvažiuos automobilis per tą laiką?

12. Kodėl taupant automobilio degalus patariama vengti ilgų įsibėgėjimų mažu greičiu, neleisti buksuoti, ilgoje nuokalnėje išjungti variklį?

13. Įrodykite, kad automobilio stabdymo kelias nepriklauso nuo jo masės ir apskaičiuojamas pagal formulę $s = \frac{v_0^2}{2\mu g}$.

14. Didžiausias dar saugus greitis važiuojant posūkiu priklauso nuo posūkio spindulio R ir slydimo trinties koeficiento μ. Įrodykite, kad $v^2 = \mu R g$.

18. Kūnų pusiausvyra. Jėgų momentų taisyklė

Žinome, kad kūną veikiant kelioms jėgoms (sunkio, atramos reakcijos, trinties ir t. t.), jo judėjimą apibūdina antrasis Niutono dėsnis. Dažnai susidaro tokios sąlygos, kad visų kūną veikiančių jėgų atstojamoji lygi nuliui, t. y. kiekviena jėga kompensuoja visų kitų veikimą. Tada kūnas gali judėti pastoviu greičiu arba išlikti rimtyje. Nagrinėdami kūnų pusiausvyrą, atkreipiame jūsų dėmesį, kad viena iš pirmųjų pusiausviro kūno sąlygų yra ta, jog visų jį veikiančių išorinių jėgų atstojamoji turi būti lygi nuliui:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + ... + \vec{F}_n = 0, \text{ arba } \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = 0. \quad (45)$$

Akivaizdu, kad ir jėgų projekcijų bet kurioje ašyje algebrinė suma kūnui esant rimtyje yra lygi nuliui. Ši sąlyga tinka visiems kūnams nepriklausomai nuo to, ar jie turi įtvirtintą ašį, apie kurią galėtų suktis.

Kūną veikiančiai jėgai apibūdinti būtina žinoti tos jėgos veikimo tašką. Pakeitus tašką, į kurį veikia jėga, dažnai pasikeičia šios jėgos veikimo pasekmė. Bandymais nustatyta, kad perkėlus jėgos veikimo tašką išilgai tiesės, kuri sutampa su jėgos $\vec{F}$ vektoriaus kryptimi, jėgos veikimas nepakinta (garvežys traukia ar stumia vagonus). **Tiesė, einanti per jėgos veikimo tašką jėgos veikimo kryptimi, yra vadinama jėgõs veikìmo lìnija.**

Jei dviejų (ar daugiau) jėgų veikimo tiesės nesutampa, tai, net esant jėgų projekcijų į kurią nors ašį lygybei, gali susidaryti galimybė kūnui pasisukti. Sukimasis, lydimas slinkimo, vyks tol, kol jėgų veikimo linijos nesutaps. Nagrinėsime pusiausvyrą tokių kūnų, kurie negali slinkti, nes jie yra pritvirtinti prie nejudančios ašies taip, kad galėtų apie ją tik suktis (36 pav.).

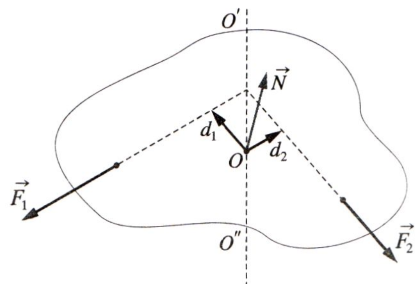
Veikiamas jėgų $\vec{F}_1$ ir $\vec{F}_2$, kūnas neslenka, nes jų veikimą atsveria atramos reakcijos jėga $\vec{N}$. Jei bent vienos iš jėgų $\vec{F}_1$ ar $\vec{F}_2$ nebūtų – kūnas suktųsi.

Jėga, kurios veikimo tiesė eina per kūno sukimosi centrą O, sukimosi nesukelia, t. y. jei atstumas nuo jėgos veikimo linijos iki sukimosi ašies lygus nuliui, tokia jėga kūno neįsuks. Galima daryti išvadą, kad nors jėgos $\vec{F}_1$ ir $\vec{F}_2$ yra skirtingų didumų ir krypčių, bet jų sukamasis poveikis į priešingas puses atsveria vienas kitą. Kyla klausimas: koks fizikinis dydis susijęs su sukamuoju veikimu? **Nustatyta, kad fizikinis dydis, kuris yra lygus jėgos $\vec{F}$ ir trumpiausio atstumo nuo jėgos veikimo linijos iki sukimosi ašies (jėgos peties) sandaugai, vadinamas jėgõs (sukimo) momentù:**

$$\vec{M} = \vec{F}d. \quad (46)$$

36 paveiksle pavaizduotas kūnas nesisuka, nes jėgos $\vec{F}_1$ momentas $M_1 = F_1 d_1$ atsveria jėgos $\vec{F}_2$ momentą $M_2 = F_2 d_2$. Taigi $F_1 d_1 = F_2 d_2$.

Jėgos momentas yra vektorinis dydis. Susitarta, kad sukimo momentas yra teigiamas,



36 pav.

kai jėga kūną pasuka laikrodžio rodyklės kryptimi, ir neigiamas, kai jėgos veikiamas kūnas pasukamas priešinga laikrodžio rodyklei kryptimi. Tai svarbu žinoti, kai kalbame apie kūną veikiančių sukimo momentų didumą. Todėl pagal jėgų momentų taisyklę: **kūnas yra pusiausviras, kai visų veikiančių išorinių jėgų momentų geometrinė suma nagrinėjamos ašies atžvilgiu lygi nuliui.** Iš 36 paveikslo matome, kad $M_1 - M_2 = 0$, arba $F_1d_1 - F_2d_2 = 0$.

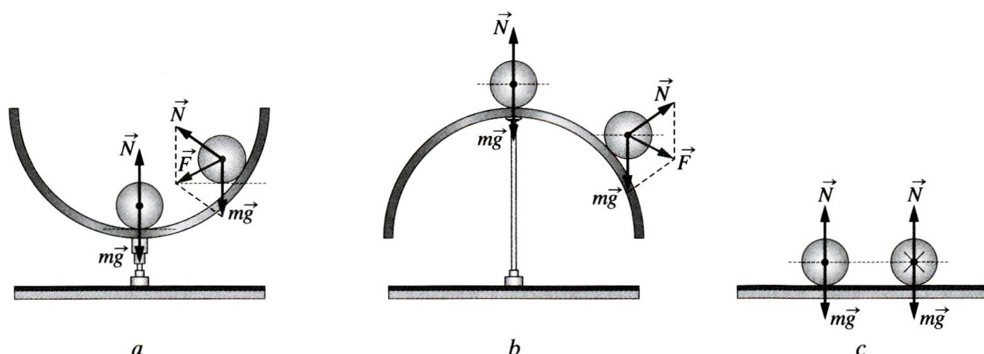
Vadinasi, antrąją pusiausviro kūno sąlygą galime užrašyti taip:

$$\vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_3 + ... + \vec{M}_n = 0, \text{ arba } \sum_{i=1}^{n} \vec{M}_i = 0. \quad (47)$$

Kai kūnas yra pusiausviras, jėgų momentų taisyklė (47) galioja kartu su jėgų taisykle (45) ir ją papildo kūno su įtvirtinta sukimosi ašimi atveju.

Jėgų momentų taisyklės taikymo pavyzdžių yra daug: ja remiasi visi sverto pagrindu veikiantys paprastieji mechanizmai.

Kūnų, pakabintų ant pakabos arba gulinčių ant atramos, pusiausvyra gali būti kelių rūšių: *pastovióji, nepastovióji* ir *beskirtė.*



37 pav.

Pastovióji pusiáusvyra yra tokio kūno, kurį verčiant jo masės centras kyla aukštyn, ir atsiradęs sunkio jėgos momentas ne griauna kūną, o grąžina jį į pusiausvyros padėtį (37 pav., *a*).

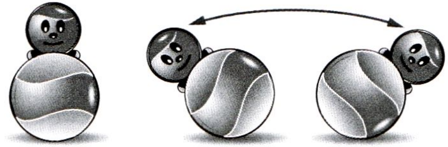
Nepastovióji pusiáusvyra yra tokio kūno, kurį verčiant jo masės centras leidžiasi žemyn, ir atsiradęs sunkio jėgos momentas verčia kūną, negrąžindamas jo į pusiausvyros padėtį (37 pav., *b*).

Kūno pusiáusvyra yra beskirtė, jei jo masės centras, bet kaip judant kūnui, išlieka tame pačiame lygyje arba kūno sukimosi ašis eina per jo masės centrą (37 pav., *c*).

Žinoma daug būdų kūno stabilumui padidinti, bet dažniausiai naudojami šie: 1) padidinamas atramos plotas; 2) pažeminamas masės centras; 3) masės centras išdėstomas virš pagrindo geometrinio centro; 4) padidinama kūno masė.

Žinant pastoviosios pusiausvyros sąlygas, galima sukonstruoti įstabiai stabilius žaislus ir konstrukcijas.

Paprasčiausias toks žaislas – stovukas (38 pav.). Į kurią pusę jį beverstum, jis vėl atsistoja stačias. Stovuko paslaptis – sunkus metalinis šratas, su kuriuo kartu pakyla viso stovuko masės centras, tad jis pats atsistoja į pradinę stabilią padėtį.



38 pav.

Savotiški žaislinio stovuko analogai yra aukšti šiuolaikiniai bokštai. Dėl didelės ir labai masyvios požeminės dalies jų masės centras dažnai yra po žeme, todėl, padidėjus svyravimo amplitudei (dėl įvairių išorinių veiksnių), bokštai išlieka stabilūs.

Net lynu važiuojančio akrobato, kuris rankose laiko stangrią vielą su dviem žemai nuleistais masyviais rutuliukais galuose, pusiausvyra gali būti pastovi. Šio žaisliuko masės centras yra po viela ir kyla akrobatui krypstant į šoną. Vadinasi, šio žaisliuko stabilumą, tuo pačiu ir judančio lynu akrobato pusiausvyrą lemia fizikos dėsniai.

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl žmogus, nešdamas ant pečių krovinį, palinksta į priekį?

2. Kodėl antys ir žąsys eidamos krypuoja?

3. Leisdamasis nuo kalno, slidininkas pritupia. Kodėl?

4. Kodėl sveiką degtuką perlaužti lengviau negu jo pusę?

5. Ant stalo stovi dvi taurės – tuščia ir pripildyta gėrimo. Kuri iš jų pirmoji nugrius verčiant stalą?

6. Ar gali materialusis taškas suktis apie tam tikrą ašį, kai nė viena iš šį tašką veikiančių jėgų nenukreipta į sukimosi ašį? Kodėl?

7. Nepatyrusio irkluotojo dviem irklais vairuojama valtis dažnai daro lanką ir krypsta į dešinę. Kodėl?

8. Prie 80 cm ilgio ir 4 kg masės lazdos galų prikabinti 20 kg ir 15 kg masės kūnai. Kur reikia atremti lazdą, kad ji būtų pusiausvira horizontalioje padėtyje?

9. 6 m ilgio kopėčios taip atremtos į vertikalią sieną, kad apatinis jų galas su grindimis sudaro 60° kampą. Kopėčių trinties į grindis koeficientas lygus 0,3. Į kokį aukštį žmogus galės užlipti šiomis kopėčiomis, kol jos pradės slysti? Kopėčių masės nepaisykite.

10. Vamzdis, kurio masė 100 kg, padėtas ant dviejų horizontalių atramų. Vamzdžio ilgis 6 m, viena atrama yra prie vamzdžio galo, o kita nutolusi nuo antrojo vamzdžio galo 1 m atstumu. Apskaičiuokite atramų reakcijos jėgas.

4 SKYRIUS. TVERMĖS DĖSNIAI MECHANIKOJE

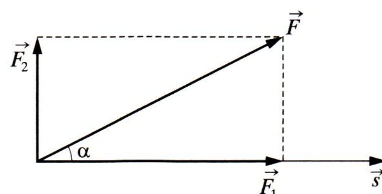
19. Mechaninis darbas

Nuo seno žmonės taiko savo ir pašalines jėgas naudingam darbui atlikti.

Fizikos požiūriu mechaninis darbas atliekamas tada, kai jėgos veikiamas kūnas pasislenka jėgos veikimo kryptimi tam tikru atstumu. Vadinasi, jei jūs stumiate spintą, bet ji nepajuda iš vietos, tai jokio darbo neatliekate. Kai lygiu keliu nešate daiktą, pats „nešimas" taip pat nėra darbas, nes kėlimo jėga veikia statmenai keliui, o šia kryptimi nešulys nejuda – jėga tik palaiko jį.

O vis dėlto žmogaus raumenys atlieka darbą ir tada, kai jis laiko naštą arba neša ją lygiu keliu. Įtempti raumenys nuolat susitraukia ir vėl atsipalaiduoja, todėl fizikos požiūriu jie darbą atlieka.

Kuo didesnė jėga stumia ar traukia kūną ir kuo toliau pasislenka jos veikiamas kūnas, tuo yra didesnis atliktas darbas. Tad jei kūną jo judėjimo kryptimi veikia pastovi jėga $\vec{F}$ ir kūnas pasislenka atstumu $\vec{s}$, tai atliktas darbas apskaičiuojamas pagal formulę $A = \vec{F} \cdot \vec{s}$. Jei jėga veikia kampu α kūno judėjimo krypties atžvilgiu (39 pav.), tai jėgą $\vec{F}$ galima išskaidyti pagal lygiagretainio taisyklę į dvi dedamąsias: $F_1 = F\cos\alpha$ (kūno judėjimo kryptimi) ir $F_2 = \vec{F}\sin\alpha$ (statmena judėjimo krypčiai). Darbą atlieka tik jėgos dedamoji F_1, todėl jis aprašomas formule:



39 pav.

$$A = F_1 s = Fs\cos\alpha. \tag{48}$$

Iš formulės matyti, jog **mechãniniu dárbu vadinamas fizikinis dydis, lygus jį veikiančios jėgos, poslinkio ir kampo kosinuso tarp jėgos ir poslinkio sandaugai.**

Darbo matavimo vienetas tarptautinėje SI vienetų sistemoje – *džáulis* $[A] = \text{Nm} = \text{J}$.

1 J – tai toks darbas, kurį atlieka 1 N jėga, perkeldama kūną 1 m atstumu.

Fizika nuvilia tuos, kurie norėtų rasti būdų darbui sumažinti – to būti negali. Įmanoma sumažinti jėgą, kurios reikia darbui atlikti, bet tuo pat metu pralaimimas kelias (gamtoje negalima ko nors laimėti kitko nepralaimint). Ši svarbi taisyklė, vadinama *auksinė mechãnikos taisyklė*, teigia: **kiek kartų laimime jėgos, tiek pat kartų pralaimime kelio.**

Auksinę mechanikos taisyklę pirmasis suformulavo senovės graikų mokslininkas Archimedas, nors sverto ar nuožulniosios plokštumos veikimą žinojo dar Senovės Babilonijos ir Egipto statybininkai, statę garsiąsias Egipto piramides. Archimedas išrado arba pagrindė kitus mechanizmus, kurių veikimas pagrįstas šia taisykle: sraigtą, krumplinę pavarą, skrysčius. Jie, kaip sudėtingų mechanizmų dalys, plačiai naudojami ir šiuolaikinėje technikoje. Auksinė mechanikos taisyklė, kaip ir kiti fizikos dėsniai, aprašo idealų atvejį, t. y. neatsižvelgia į trintį. Pagal šią

taisyklę nesunku suvokti, kad, atliekant darbą, nepriklausomai nuo to, ar naudojame paprastus mechanizmus, ar ne, – atlikto darbo dydis yra toks pats. Iš tikrųjų, naudojantis bet kuriuo mechanizmu, darbo padaugėja, nes atliekamas papildomas darbas mechanizmo dalių trinčiai nugalėti. Todėl tenka įvesti *naudìngai àtlikto dárbo*, *viso darbo* ir *naudingùmo koeficiento* sąvokas.

Naudingai atlikto darbo A_n santykis su visu atliktu darbu A_v vadinamas mechanizmo naudingùmo koeficientù ir išreiškiamas formule

$$\eta = \frac{A_n}{A_v} \cdot 100\%. \qquad (49)$$

Dažniausiai jis nurodomas procentais. Kaip jau minėjome, bet kurio mechanizmo visas atliktas darbas visada yra didesnis už naudingą darbą ($A_v > A_n$), todėl ir naudingumo koeficientas negali viršyti 100%.

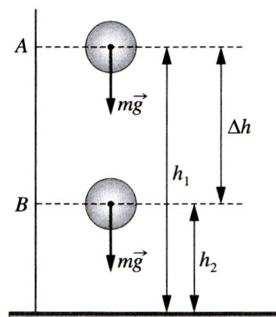
Iš to, ką aptarėme šiame paragrafe, suprantame, kad priklausomai nuo jėgos veikimo pobūdžio darbas gali būti teigiamas, neigiamas arba lygus nuliui. Šiai išvadai patvirtinti išnagrinėsime kelis pavyzdžius.

Įsivaizduokime, jog, kūną veikiant sunkio jėgai $m\vec{g}$, jis juda iš aukščio h_1 į aukštį h_2 (40 pav.).

Šiuo atveju sunkio jėgos atliktas darbas yra teigiamas, kadangi sunkio jėgos ir poslinkio vektoriai tarpusavyje yra kolinearūs (cos 0° = 1):

$$A = mg(h_1 - h_2) = mg\Delta h. \qquad (50)$$

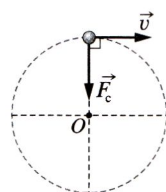
Vadinasi, $A > 0$ (Δh – atstumas, kurį kūnas krito, o krintančio kūno poslinkis yra lygus keliui).



40 pav.

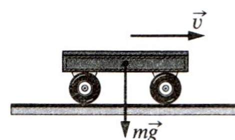
Kūnui judant vertikaliai aukštyn, sunkio jėga nukreipta priešinga kūno judėjimo kryptimi (cos 180° = –1) ir jos atliktas darbas yra neigiamas: $A = -mg\Delta h$. Akivaizdu, kad $A < 0$.

Iš 48 formulės matyti, jog sunkio jėga darbo neatlieka tada, kai trajektorija, kuria juda kūnas, yra uždara (pradinis ir galinis taškai sutampa) arba kai kampas tarp jėgos ir poslinkio lygus 90° (α = 90°), nes cos 90° = 0. Akivaizdžiai matome, kad centrinė jėga (kūnui judant apskritimu) (41 pav.) ir sunkio jėga (kai kūnas juda horizontaliu paviršiumi) (42 pav.) darbo neatlieka, nes jos veikia statmena kūno judėjimui kryptimi.



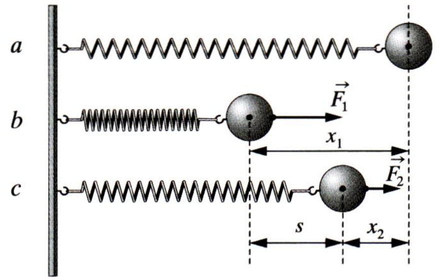
41 pav.

Kaip sunkio jėgos analogą, išnagrinėsime tamprumo jėgos atliktą darbą. 43 paveiksle, *a*, parodyta nedeformuota spyruoklė. Suspaudus spyruoklę dydžiu Δx_1, atsiranda tamprumo jėga $F_1 = -k\Delta x_1$ (43 pav., *b*). Šiek tiek atleidus spyruoklę, tamprumo jėga F_2 bus tokia: $F_2 = -k\Delta x_2$ (43 pav., *c*). Remiantis 48 formule, nagrinėjamu atveju tamprumo jėgos atliktas darbas bus lygus $A = F_{vid}s$.



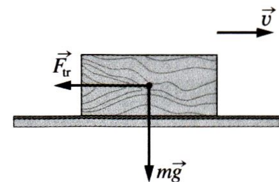
42 pav.

Vidutinį tamprumo jėgos dydį randame taip: $F_{vid} = \frac{F_1 + F_2}{2} = -\frac{k(x_1 + x_2)}{2}$. Iš paveikslo nustatome, kad spyruoklės galo poslinkis $s = x_2 - x_1$. Vidutinės tamprumo jėgos ir poslinkio išraiškas įrašome į darbo formulę: $A = -\frac{k(x_1 + x_2)}{2}(x_2 - x_1)$. Atlikę matematinius veiksmus, gauname:



43 pav.

$$A = \frac{k}{2}(x_1^2 - x_2^2) = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}. \quad (51)$$



44 pav.

Apibendrindami šią matematinę išraišką, galime teigti, kad tamprumo jėgų darbas lygus vidutinės tamprumo jėgos ir poslinkio sandaugai.

Kūnui judant horizontaliu paviršiumi, tarp paviršiaus ir judančio kūno atsiranda trinties jėga, kurios atliktą darbą bandysime užrašyti matematine išraiška. Iš 44 paveikslo matyti, kad trinties jėga yra nukreipta priešinga judančiam kūnui kryptimi, todėl kampas tarp judėjimo krypties ir trinties jėgos lygus 180° (α = 180°), o cos 180° = –1. Tai įrašę į 48 formulę, gausime tokią trinties jėgos darbo matematinę išraišką:

$$A = F_{tr}s \cos 180° = -F_{tr}s; \quad (52)$$

čia F_{tr} – trinties jėgos modulis, o s – kelias, kuriame veikia trinties jėga.

Išnagrinėjus kūną veikiančių jėgų atliktą darbą, galima teigti, kad, veikiant sunkio arba tamprumo jėgoms, kūnas gali judėti pagal arba prieš jėgos veikimo kryptį. Pirmuoju atveju darbas yra teigiamas, antruoju atveju – neigiamas. Viso judėjimo ciklo metu darbas lygus nuliui. Tuo tarpu trinties jėgų darbas, kurį atlieka kūnas judėdamas pirmyn arba atgal ir grįždamas į pradinį tašką, nėra lygus nuliui.

Klausimai ir užduotys

1. Apytiksliai įvertinkite, kas atlieka didesnį darbą: šuolininkas, šokantis į aukštį, ar šuolininkas, šokantis į tolį?

2. Sizifas užritino 100 kg masės akmenį aukštyn kalno šlaitu, kurio nuolydis 30°, o ilgis 1 km. Kokį darbą atliko Sizifas?

3. Ar vienodas darbas atliekamas įkalant vinį į rąstą ir ištraukiant ją iš rąsto?

4. Nuo kokių dydžių priklauso sunkio jėgos darbas?

5. Kūnas be trinties juda nuožulniąja plokštuma. Kokia jėga atlieka darbą? Ar to darbo didumas priklauso nuo nuožulniosios plokštumos ilgio?

6. 70 kg masės žmogus leidžiasi 20 m ilgio laiptais, kurie sudaro 30° su horizontaliąja plokštuma. Kokį darbą atlieka sunkio jėga?

7. 200 N/m standumo spyruoklės deformacija pakinta nuo 2 cm iki 6 cm. Apskaičiuokite tamprumo jėgos atliktą darbą.

8. Kūnas nueina atstumą *s*, judėjimo kryptimi veikiamas jėgos $\vec{F}$. Ar vienodą darbą atlieka ta jėga, kai kūnas juda tolygiai ir kai greitėjančiai? Atsakymą pagrįskite.

9. Koks darbas atliekamas tolygiai pastumiant 500 m kūną horizontaliu paviršiumi, jeigu jėga veikia judėjimo kryptimi, o trinties koeficientas lygus 0,02? Kūno masė lygi 200 kg.

10. Ar gali atlikti darbą slydimo trinties jėga ir rimties trinties jėga? Atsakymą pagrįskite.

11. Kokį darbą per 10 min atlieka elektrovežis, traukiantis horizontaliu keliu 3000 t masės sąstatą pastoviu 72 km/h greičiu, kai trinties koeficientas lygus 0,005?

12. Veikiamas tarpusavyje statmenų 3 N ir 4 N jėgų, kūnas pasislenka 15 m tų jėgų atstojamosios kryptimi. Kokį darbą atlieka kiekviena jėga? Kokį darbą atlieka atstojamoji jėga? Pagal kokį dėsnį sudedami darbai?

13. Pakeliant 2 kg masės kūną vertikaliai į 10 m aukštį, atliekamas 240 J darbas. Kokiu pagreičiu juda keliamas krovinys?

20. Mechaninė galia

Iš savo gyvenimiškos patirties kiekvienas žinome, kad įvairūs kūnai ar mechanizmai per vienodą laiko tarpą atlieka skirtingo dydžio darbą. Todėl, nagrinėdami jėgas ir jų atliekamą darbą, turime įvesti dar vieną svarbų ir jam giminingą fizikinį dydį – *gãlią*. *Galia apibūdina darbo atlikimo greitį arba spartą.*

Galià vadinamas fizikinis dydis, lygus mechaninio darbo ir laiko santykiui. Jis užrašomas lygtimi

$$N = \frac{A}{\Delta t}; \qquad (53)$$

čia N – mechaninė galia, A – atliktas darbas, Δt – laiko tarpas, per kurį atliktas darbas. **Bet kurio gyvūno, mašinos ar mechanizmo galia parodo, kokį vidutinį darbą per laiko vienetą jis gali atlikti.**

Galios matavimo vienetas tarptautinėje SI vienetų sistemoje išvedamas iš (53) formulės ir vadinamas *vatù*: $[N]$ = 1J/1s =1W. Galios matavimo vienetas pavadintas XVIII a. anglų fiziko ir išradėjo Džeimso Vato (*Watt*), sukonstravusio pirmąją garo mašiną, vardu.

1 W – tai tokia galia, kai per vieną sekundę atliekamas vieno džaulio darbas. Kiekybiniu požiūriu tai nėra didelis matavimo vienetas, todėl galia dažnai nurodoma kilovatais (kW), megavatais (MW):

$$1\ \text{kW} = 1000\ \text{W} = 10^3\ \text{W};\ 1\ \text{MW} = 1\ 000\ 000\ \text{W} = 10^6\ \text{W}.$$

Darbas, kurį atlieka 1 kW galios mašina per 1 h, vadinamas kilovãtvalande:

$$[A] = 1\ \text{kW h} = 10^3\ \text{W} \cdot 3600\ \text{s} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J}.$$

Palyginkite įvairių gyvūnų, žmogaus, jo sukurtų mašinų bei Žemėje ir kosmose vykstančių procesų galią (žr. 1 lentelę).

1 lentelė

Žmogaus ir kai kurių gyvūnų, mašinų, įrenginių bei spinduliuojančių dangaus kūnų galia

Objektas	Galia
Žmogus	Vidutinė – 100 W Trumpalaikė – 2 kW
Uodas	10^{-6} W
Kiškis	30 W
Arklys	700 W
Dramblys	3 kW
Motorinis dviratis	600 W
Vato garo mašina (1778 m.)	10,5 kW
Automobilis „Audi“	70 kW
Vikšrinis traktorius	50–150 kW
Laivas „Raketa“	800 kW
Ledlaužis „Arktika“	55 MW
Kauno hidroelektrinė	100 MW
Ignalinos atominė elektrinė	2300 MW
Raketos „Saturn“ (nuskraidinusios pirmuosius žmones į Mėnulį) pirmoji pakopa	$12 \cdot 10^{11}$ W
Saulė	$3{,}86 \cdot 10^{26}$ W
Supernova (sprogstanti žvaigždė)	10^{36} W

Klausimai ir užduotys

1. Koks dydis yra galia – skaliaras ar vektorius?

2. Nuo ko priklauso tolygiai judančio kūno (kurį judėti verčia variklis) greitis?

3. Kuriam tikslui automobiliuose įrengiama bėgių sistema? Atsakymą pagrįskite, taikydami galios sąvoką.

4. Kuris fizikinis dydis išreiškiamas kilovatvalandėmis?

5. Ar greitėjančio automobilio traukos jėga yra pastovi? (Variklio galia nekinta.)

6. Jono masė du kartus didesnė negu jo brolio Šarūno. Tačiau Šarūnas užbėga laiptais per 5 sekundes, o Jonas – tik per 10 sekundžių. Kuris iš brolių galingesnis?

7. 1600 kg masės automobilis pajuda iš vietos ir tolygiai greitėdamas per 10 s pasiekia 15 m/s greitį. Kokia yra automobilio galia?

8. Lėktuvas skrenda tiesiai ir tolygiai 900 km/h greičiu. Jo variklių galia lygi 1800 kW. Apskaičiuokite oro pasipriešinimo jėgą.

9. Keliamasis kranas, kurio variklio galia 8 kW, kelia krovinį pastoviu 6 m/min greičiu. Apskaičiuokite krovinio masę.

10. Kokį darbą atlieka hidroelektrinė per metus, jei vidutinė jos generatorių galia lygi 2,5 MW?

21. Mechaninė energija. Energijos tvermės dėsnis

Dar senovės mokslininkai įtarė, kad, susmulkinus ar ištirpinus kūną, jo medžiagos kiekis nepakinta. Romėnų poetas ir filosofas Lukrecijus veikale „Apie daiktų prigimtį“ rašė:

„...medžiaga gi visa nemirtinga...
Daiktas nė vienas, vadinas, nieku niekuomet nepavirsta,
Bet suskyla visi jie atgal į kūnus pirmykščius“.

Niutonui įvedus masės, kaip medžiagos kiekio, sąvoką, fizikai palaipsniui įsitikino, kad masė fizikinių procesų metu nekinta. Vėliau chemikai įrodė, kad ir cheminiuose procesuose bendra reaguojančių medžiagų masė nesikeičia. Tik XX a. buvo nustatyta, kad, kūnams judant greičiais, artimais šviesos greičiui, taip pat branduolinių reakcijų metu masės tvermės dėsnis nebegalioja: masė yra susijusi su energija, tad masės tvermės dėsnis yra bendresnio energijos tvermės dėsnio atskiras atvejis.

Enèrgija yra viena iš svarbiausių fizikos sąvokų, deja, jos negalime betarpiškai įvertinti žmogaus pojūčiais. Net ir fizikai kelis šimtmečius aiškinosi ir ginčijosi dėl energijos apibrėžimo ir fizikinio jos supratimo apibūdinimo.

Ji nėra nematoma medžiaga, pereinanti iš vieno kūno į kitą, kaip ją kažkada bandyta įsivaizduoti, joje nėra ir nieko paslaptingo ar antgamtiško. Fizikai energiją supranta, kaip kūno gebėjimą atlikti darbą. Vadinasi, **enèrgija yra lygi maksimaliam darbui, kurį gali atlikti kūnas esamomis sąlygomis.** Išmokome šį darbą apskaičiuoti, todėl energija yra griežtai apibrėžta kaip ir visi kiti fizikiniai dydžiai. Tarptautinėje SI vienetų sistemoje jos matavimo vienetas yra toks pats kaip ir darbo – *džáulis*: [W]=J.

§19 susipažinome su sunkio jėgos darbo išraiška (50). Šią formulę galima užrašyti ir taip:

$$A = -(mgh_2 - mgh_1). \qquad (54)$$

Iš formulės matyti, kad sunkio jėgos darbas, perkeliant m masės kūną iš taško, kuris yra aukštyje h_1 (nuo Žemės paviršiaus), į tašką, kuris yra aukštyje h_2, lygus fizikinio dydžio mgh pokyčiui su priešingu ženklu. Šis fizikinis dydis vadinamas kūno *poteñcine enèrgija* ir žymimas W_p:

$$W_p = mgh. \qquad (55)$$

Iš 54 ir 55 lygčių matyti, kad **sunkio jėgos atliktas darbas lygus kūno poteñcinės enèrgijos pokyčiui su priešingu ženklu:**

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}) = -\Delta W. \qquad (56)$$

Pakelto virš Žemės kūno potencinė energija priklauso nuo pasirinkto nulinio lygio, t. y. aukščio, kuriame potencinė energija laikoma lygi nuliui. Susitarta, kad kūno potencinė energija Žemės paviršiuje lygi nuliui, o kūno, esančio aukštyje h virš Žemės paviršiaus, ji bus apibūdinama 55 formule. Vadinasi, sunkio veikiamo kūno potencinė energija lygi darbui, kurį ji atlieka, perkeldama kūną į nulinį lygį.

Kadangi potencinei energijai apibūdinti yra svarbu pasirinktas nulinis lygis, tai ji gali turėti teigiamas ir neigiamas vertes (būti teigiama ir neigiama). Kūnas, esantis gylyje h nuo Žemės paviršiaus, turi neigiamą potencinę energiją ($W_p = -mgh$). Tuo tarpu **sunkio jėgos darbas nuo pasirinkto nulinio lygio nepriklauso, nes apibūdinamas potencinės energijos pokyčiu.**

§19 44 paveiksle nagrinėjome prie k standumo (tamprumo) spyruoklės pritvirtinto kūno judėjimą. Suspaudus spyruoklę ir paskui ją atleidus, tamprumo jėgos veikiamas, kūnas pradėjo judėti ir pasislinko tam tikru atstumu. (51) lygtį, apibūdinančią tamprumo jėgos darbą, perrašykime taip:

$$A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right). \quad (57)$$

Fizikinis dydis, lygus kūno standùmo (tamprumo) ir jo deformacijos kvadrato sandaugos pusei, vadinamas tam̃priai defor̃múoto kū̃no poteñcine enèrgija ir užrašomas lygtimi

$$W_p = \frac{kx^2}{2}. \quad (58)$$

Šioje formulėje k – tamprumo koeficientas, Δx – kūno dalių poslinkis (deformacija).

Analogiškai sunkio jėgos darbui, iš 57 ir 58 lygčių išplaukia, kad tamprumo jėgos darbas lygus tampriai deformuoto kūno potencinės energijos pokyčiui su minuso ženklu:

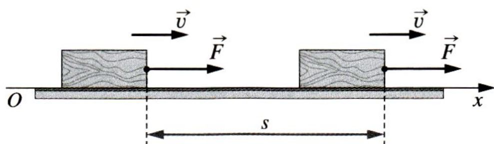
$$A = -(W_{p2} - W_{p1}) = -\Delta W_p. \quad (59)$$

Kai $x_2 = 0$ ir $x_1 = x$, tai iš 57 ir 58 formulių matyti, kad $W_p = A$.

Tai reiškia, kad *tampriai deformuoto kūno potencinė energija lygi darbui, kurį atlieka tamprumo jėga kūnui pereinant į nulinės deformacijos būseną*.

Iš sąveikaujančių kūnų gravitacijos ir tamprumo jėgų bei nagrinėtų potencinės energijos pavyzdžių galime suformuluoti potencinės energijos ypatumus. 1. *Potencinės energijos negali turėti kūnas, nesąveikaujantis su kitais kūnais.* **Poteñcinė enèrgija – kūnų sąveikos energija.** 2. *Pakeltas virš Žemės kūnas turi potencinės energijos*, kadangi tai yra nagrinėjamo kūno sąveikos su Žeme – visuotinės traukos (gravitacijos) jėgos – energija. Tampriai deformuoto kūno potencinė energija – tai kūno atskirų dalių sąveikos tamprumo jėgomis energija.

Darbą gali atlikti ir tam tikru greičiu judantis kūnas (pvz., smogdamas į kitą kūną). Tam tikslui išsiaiškinkime ryšį tarp darbo ir judančio kūno greičio pokyčio. Išnagrinėkime kūną, kurį veikia pastovi jėga $\vec{F}$ (ji gali būti ir kelių jėgų atstojamoji). Ši jėga suteikia kūnui pagreitį ir dėl to kinta kūno greitis. Be to, ji atlieka darbą, nes kūnas pasislenka (45 pav.).



45 pav.

Šiame pavyzdyje jėgos ir poslinkio vektoriai yra vienoje tiesėje ir nukreipti į tą pačią pusę. Koordinačių ašį nukrei-

piame irgi ta pačia kryptimi. Tuomet jėgos $\vec{F}$, poslinkio $\vec{s}$, pagreičio $\vec{a}$ ir greičio $\vec{v}$ projekcijos bus lygios pačių vektorių moduliams. Užrašykime jėgos darbo išraišką $A = Fs$ ir antrojo Niutono dėsnio formulę $F = ma$. Žinome, kad tiesiaeigio tolygiai kintamo judėjimo poslinkis ir greitis susiję taip: $s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$; čia v ir v_0 – kūno greičio vektoriaus moduliai nagrinėjamo kelio ruožo pradžioje ir pabaigoje. Į darbo formulę įrašę jėgos ir kelio išraiškas, gauname: $A = ma\frac{v^2 - v_0^2}{2a}$. Atlikę matematinius veiksmus, turime:

$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}. \qquad (60)$$

Gavome formulę, siejančią jėgos atliktą darbą A ir kūno greičio (tiksliau, greičio kvadrato) pokytį.

Dydis, lygus kūno masės ir jo greičio kvadrato sandaugos pusei, vadinamas kūno kinètine enèrgija (gr. *kinetikos* – judėjimas) ir žymimas raide W_k:

$$W_k = \frac{mv^2}{2}. \qquad (61)$$

60 formulę galima užrašyti ir taip:

$$A = W_{k2} - W_{k1} = \Delta W_k. \qquad (62)$$

Kūną veikiančios jėgos (arba jėgų atstojamosios) darbas lygus kūno kinetinės energijos pokyčiui. Ši formulė teisinga bet kokioms kūną veikiančioms jėgoms: tamprumo, trinties ir visuotinės traukos jėgoms (tarp jų ir sunkio jėgai).

Kai kūnas juda jėgos veikimo kryptimi, jėga atlieka teigiamą darbą, nes $\frac{mv_2^2}{2} > \frac{mv_1^2}{2}$, t. y. **kūno kinetinė energija didėja.** Taip ir turi būti, nes kūno judėjimo kryptimi veikianti jėga padidina to kūno greičio modulį. **Kūno kinetinė energija mažėja, kai jėga yra priešingos krypties negu poslinkis ir atlieka neigiamą darbą.** Remdamiesi 60 formule, teigiame, jog kinetinė energija matuojama tais pačiais vienetais kaip ir darbas, t. y. džauliais.

Apibendrindami galime teigti, kad **kinetinė energija yra fizikinis dydis, apibūdinantis judantį kūną. Jos pokytis lygus darbui, kurį atlieka kūną veikianti jėga.**

Išnagrinėkime visiems gerai žinomą pavyzdį: automobilio vairuotojams svarbu žinoti stabdymo kelią, kad galėtų pasirinkti saugų greitį. Todėl, remdamiesi sąryšiu tarp darbo ir kinetinės energijos, pabandykime įrodyti svarbų dėsningumą, kad stabdymo kelias yra proporcingas automobilio greičio kvadratui.

Tarkime, kad prieš stabdant automobilį, jis judėjo greičiu v_0. Stabdymo metu automobilio kinetinė energija sumažėja nuo $\frac{mv_0^2}{2}$ iki 0. Šis energijos pokytis turi būti lygus stabdymo darbui. Kai įjungiame stabdžius, automobilį veikia pastovi kelio trinties jėga F_{tr}, o stabdymo kelias yra s, tai darbas, atliktas automobiliui

sustabdyti, bus $A = F_{tr}s$. Kadangi darbas atliekamas kintant kūno kinetinei energijai, tai $F_{tr}s = \frac{mv_0^2}{2}$. Iš čia išplaukia, kad stabdymo kelias

$$s = \frac{mv_0^2}{2F_{tr}}. \quad (63)$$

Užrašę stabdymo kelius tam pačiam automobiliui, judančiam greičiais v_1 ir v_2, ir paėmę jų santykį, gauname, jog stabdymo keliai yra proporcingi greičių kvadratams: $\frac{s_1}{s_2} = \frac{v_1^2}{v_2^2}$. Iš pastarosios lygties akivaizdžiai matyti, kad automobilio greičiui iki stabdymo esant dvigubai didesniam, stabdymo kelias pailgės keturgubai. 2 lentelėje pavaizduotas automobilio stabdymo kelias (išjungus variklį) esant įvairiems greičiams prieš stabdymą.

2 lentelė

Automobilio greitis prieš stabdant	Stabdymo kelias (išjungus variklį)
30 km/h	10 m
60 km/h	40 m
120 km/h	160 m

Išsiaiškinome, kad potencinė energija apibūdina sąveikaujančius, o kinetinė – judančius kūnus. Šios energijos kinta dėl kūnų sąveikos tik tada, kai veikiančios jėgos atlieka darbą.

Pagrindinė energijos savybė, teikianti jai didžiulės reikšmės, yra *enèrgijos tvermẽ*. Tam, kad išsiaiškintume energijos tvermės dėsnį, išnagrinėkime, kaip kinta uždaros sistemos sąveikaujančių kūnų energija. Jeigu keletas kūnų tarpusavyje sąveikauja tik gravitacijos ir tamprumo jėgomis ir jokios išorinės jėgos jų neveikia, tai tamprumo ir gravitacijos jėgų darbas lygus kūno potencinės energijos pokyčiui su minuso ženklu ir užrašomas 56 formule. Tačiau, kūnui judant, tų pačių jėgų darbas pagal 60 formulę lygus kinetinės energijos pokyčiui. Palyginę šias dvi formules, matome, kad uždaros sistemos kūnų kinetinės energijos ir potencinės energijos pokyčių absoliučiosios vertės lygios, o ženklai priešingi: $W_{k2} - W_{k1} = -(W_{p2} - W_{p1})$. Pertvarkę pastarąją lygtį, gauname:

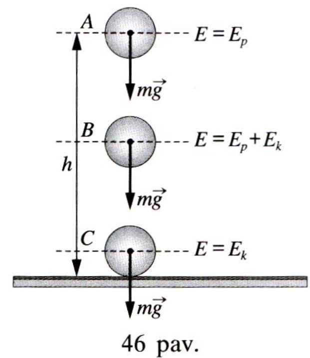
$$W_{k1} + W_{p1} = W_{k2} + W_{p2}. \quad (64)$$

Iš šios formulės matyti, kad **uždaros sistemos kūnų, veikiančių vienas kitą gravitacijos ir tamprumo jėgomis, kinetinės ir potencinės energijos suma nekinta.** Šis teiginys vadinamas mechaninės *enèrgijos tvermẽs dėsniu.*

Kūnų kinetinės ir potencinės energijos suma vadinama pilnutinė mechãnine enèrgija ($W = W_k + W_p$).

Tarkime, kad kūnas, veikiamas gravitacinės sąveikos (sunkio jėgos), krinta žemyn iš aukščio h (46 pav.). Jo potencinė energija (kritimo į žemę metu) mažėja,

o kinetinė energija didėja, nes didėja judančio kūno greitis. Padarę prielaidą, kad kūnas juda uždaroje sistemoje ir pritaikę energijos tvermės dėsnį, galime teigti, jog aukščiausiame taške A kūno pilnutinė mechaninė energija lygi jo potencinei energijai. Pasiekus tašką B, jo potencinė energija sumažėja, bet dėl judėjimo kūnas įgyja kinetinės energijos (tiek, kiek sumažėjo potencinė kūno energija). Pilnutinė mechaninė energija taške B lygi kinetinės ir potencinės energijų sumai. Kūnui nukritus ant žemės (taške C), visa potencinė energija (kūno turėta taške A) virsta jo kinetine energija, todėl kritimo į žemę metu jis įgyja didžiausią greitį ir pilnutinė mechaninė energija lygi kūno kinetinei energijai. Apibendrindami paveiksle pavaizduoto kūno judėjimą ir pritaikę pilnutinės mechaninės energijos sąvoką, tvermės dėsnį galime perfrazuoti taip: **uždaros sistemos kūnų, veikiančių vienas kitą gravitacijos ir tamprumo jėgomis, pilnutinė mechaninė energija nekinta.**



46 pav.

Iš energijos tvermės dėsnio nesunku suvokti, kad sąveikaujančių kūnų kinetinė ir potencinė energija gali virsti viena kita, tačiau bendras jų kiekis išlieka nepakitęs.

Remiantis energijos tvermės dėsniu, galima geriau ir plačiau suvokti fizikinę darbo sąvokos prasmę. Gravitacijos ir tamprumo jėgų darbas lygus kūnų kinetinės energijos padidėjimui, o tuo pačiu – jų potencinės energijos sumažėjimui. Vadinasi, darbas lygus vienos rūšies energijai, virtusiai kitos rūšies energija.

Atliekant eksperimentus ar stebint gamtoje vykstančius realius procesus, pastebėta, kad sąveikaujančių kūnų mechaninė energija ne visada tvari. Mechaninės energijos tvermės dėsnis negalioja, kai tarp kūnų veikia trinties jėga. Iš savo gyvenimiškos patirties kiekvienas žinome, kad judantis kūnas sustoja, svyruoklės svyravimai gęsta, atšokęs nuo grindų sviedinukas pakyla į vis mažesnį aukštį. Nesigilinant į šių reiškinių pasekmes, atrodytų, kad energija tarsi išnyksta. Deja, taip nėra, nes kiekvienas judantis kūnas dėl trinties jėgų veikimo daugiau ar mažiau įkaista (padidėja jo dalelių judėjimo energija) ir jo kinetinė energija virsta šiluminio judėjimo energija. Taip eksperimentuodami, fizikai padarė išvadą: kai stinga energijos, reikia ne energijos tvermės dėsnio atsisakyti, o ieškoti papildomų energijos rūšių. Taip buvo atrastos vidinė, cheminė, elektros ir kitos energijos rūšys, o XX a. padaryta geniali išvada, kad kiekviename kūne slypi didžiulė energija, susijusi su kūno mase. Vadinasi, **bet kurios fizikinės sąveikos metu energija neatsiranda ir neišnyksta, o tik viena jos rūšis virsta kita rūšimi ir gali būti perduodama iš vieno kūno kitam.** Šis eksperimentais įrodytas faktas vadinamas *enèrgijos tvermẽs ir̃ vir̃smo dė́sniu*.

Energija perduodama iš vieno kūno kitam atliekant darbą. Kūnui suteikta energija yra lygi darbui, kurį atlieka jį veikianti jėga. Žmogus, stumdamas vežimėlį arba mesdamas sviedinį, suteikia kūnui energijos, kurią jis gavo iš maisto kaip cheminę energiją. Energija, sukaupiama spyruoklėse, užtvankose, akumuliatoriuo-

se ir pan., vėliau reikiamu momentu panaudojama, t. y. galimybė atlikti darbą tampa konkrečiu darbu.

Energijos tvermės dėsnis reguliuoja įvairius procesus gamtoje. Jis persmelkia visą fiziką, sieja įvairias fizikos sritis ir fiziką su kitais mokslais.

Mechanikoje žinomi dar du – kūno impulso ir kūno impulso momento tvermės – dėsniai, bet jie ne tokie visuotiniai kaip energijos tvermės dėsnis, nes galioja tik kai kurioms fizikinėms sistemoms ar judėjimo rūšims.

Klausimai ir užduotys

1. Kas yra kūno kinetinė energija?

2. Kaip kinta kūno kinetinė energija, kai jį veikianti jėga atlieka teigiamą darbą? neigiamą darbą?

3. Ar kinta judančio kūno kinetinė energija kintant jo greičio vektoriaus krypčiai?

4. Ar gali pasikeisti kūno kinetinė energija, jeigu jo neveikia išorinės jėgos?

5. Beždžionė, kurios masė 4,2 kg, peršoka nuo vienos šakos ant kitos, esančios 1,5 m aukščiau. Kaip pasikeis beždžionės potencinė energija? Iš kur atsirado ši energija?

6. Kokį greitį įgaus strėlė, iššauta iš lanko, suteikiant jai 100 J energijos? Strėlės masė 50 g.

7. Kiek kartų pakinta automobilio kinetinė energija, jo greičiui padidėjus tris kartus?

8. Lašiša, plaukdama į nerštavietę upės aukštupyje, priplaukė 2 m aukščio krioklį. Kokiu greičiu ji turi iššokti iš vandens, kad įveiktų kliūtį? Kodėl tas greitis nepriklauso nuo lašišos masės?

9. Ar gali du kūnai, būdami skirtingame aukštyje, turėti vienodo didumo potencines energijas?

10. Naudodamiesi tik energijos tvermės dėsniu, nustatykite, kokį maksimalų aukštį pasieks akmuo, išmestas aukštyn 2 m/s greičiu (į oro pasipriešinimą neatsižvelkite).

11. Automobiliui važiuojant 60 km/h greičiu lygiu keliu, sugedo jo stabdžiai, ir jis, dėl inercijos nuvažiavęs 200 m, sustojo. Kokį stabdymo kelią nuvažiuotų automobilis, jei jo greitis būtų 90 km/h?

22. Judesio kiekis ir jo tvermė

Uždarai kūnų sistemai, t. y. tokiai, kurios neveikia išorėje esantys kūnai, galioja ne vien energijos, bet ir kūno impulso tvermės dėsniai. Iš karto gali kilti klausimas, ar Žemėje galima uždara sistema, jeigu visus joje esančius kūnus veikia kitos planetos, Saulės, net tolimų žvaigždžių trauka, o ir pačius kūnus nelengva izoliuoti nuo aplinkos poveikio. Tačiau šie poveikiai nėra esminiai, nagrinėjamam reiškiniui jie kur kas mažiau svarbūs negu pati sąveika tarp sistemą sudarančių kūnų. Todėl fizikai nuolat naudoja uždarą sistemą kaip vieną iš idealių, pavyzdinių atvejų. Kūnai, susiduriantys ore ar ant lygaus paviršiaus, atomo branduolys ir jį supantys elektronai, Saulės sistema – tai sistemos, kurias galima laikyti uždaromis.

Kur kas anksčiau, negu I. Niutonas suformulavo savo judėjimo dėsnius, fizikai bandė aiškinti, kad turi būti kažkoks fizikinis dydis, nusakantis „judėjimo jėgą“ arba „ judėjimo stiprį“, kuris kūnų smūgio metu nesikeičia. Kuo didesnė „judėjimo jėga“, tuo sunkiau sustabdyti kūną ir tuo stipriau jis veikia kitą kūną smūgio metu. Be to, „smūgio stipris“ priklauso ne tik nuo smogiančio kūno greičio, bet ir nuo jo masės. Todėl „judėjimo stipriui“ apibūdinti buvo įvesta kūno *impùlso* sąvoka (lot. *impulsus* – smūgis, postūmis) arba **jùdesio kiẽkis, kuris apibrėžiamas kaip kūno masės ir jo greičio sandauga**

$$\vec{p} = m\vec{v}. \qquad (65)$$

Greitis yra vektorius, todėl ir judesio kiekis yra vektorinis dydis, apibūdinamas didumu ir kryptimi. Jo vektoriaus kryptis sutampa su kūno greičio vektoriaus kryptimi. Tarptautinėje SI vienetų sistemoje judesio kiekio matavimo vienetas $[p]$ = 1 kg m/s. **Judesio kiekį, lygų 1 kg m/s, turi 1 kg masės kūnas, judantis 1 m/s greičiu.** *Judesio kiekis yra kiekybinė kūnų slenkamojo judėjimo charakteristika.*

Tarkime, kad m masės kūną per laiko tarpą Δt veikė jėga $\vec{F}$. Dėl to kūno greitis pakito nuo $\vec{v}_0$ iki $\vec{v}$. Judančio kūno pagreitį galime išreikšti lygtimi $\vec{a} = \dfrac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$. Remiantis antruoju Niutono dėsniu, jėgą $\vec{F}$ galima išreikšti taip: $\vec{F} = m\vec{a} = \dfrac{m(\vec{v} - \vec{v}_0)}{\Delta t}$. Pertvarkę lygtį, gauname:

$$\vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0. \qquad (66)$$

Fizikinis dydis, lygus jėgos $\vec{F}$ ir jos veikimo laiko Δt sandaugai, vadinamas jėgõs impùlsu. Dešinėje šios lygties pusėje yra judesio kiekio pokytis. Vadinasi, **judesio kiekio pokytis lygus jį sukėlusios jėgos impulsui**:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}. \qquad (67)$$

Dabar išsiaiškinsime, kaip kinta dviejų sąveikaujančių kūnų judesio kiekiai. Tam tikslui m_1 ir m_2 masės kūnų greičius prieš sąveiką pažymėkime $\vec{v}_1$ ir $\vec{v}_2$, o po sąveikos – $\vec{v}_1'$ ir $\vec{v}_2'$ (47 pav.).

Pagal trečiąjį Niutono dėsnį sąveikaujančius kūnus veikiančių jėgų moduliai yra lygūs, o kryptys – priešingos $(\vec{F}$ ir $-\vec{F})$. Remdamiesi 67 lygybe, sąveikaujančių kūnų judesio kiekių pokyčius užrašysime taip: $\vec{F}\Delta t = m_1\vec{v}_1' - m_1\vec{v}_1$ ir $-\vec{F}\Delta t = m_2\vec{v}_2' - m_2\vec{v}_2$. Iš šių lygčių gauname:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_1' + m_2\vec{v}_2'. \qquad (68)$$

Akivaizdžiai įsitikinome, jog dviejų kūnų judesio kiekių vektorinė suma prieš sąveiką lygi jų judesio kiekių vektorinei sumai po sąveikos.



47 pav.

Sąveikaujant uždaros sistemos kūnams, jų greičiai ir judesio kiekiai keičiasi, bet pilnutinis visų bet kaip sąveikaujančių uždaros sistemos kūnų judesio kiekis nepakinta.

Tai vienas svarbiausių gamtos dėsnių, vadinamasis *jùdesio kiẽkio tvermẽs dė́snis*. Jį taikome sąveikaujančių kūnų sistemoms tik tada, kai atskaitos sistema yra inercinė.

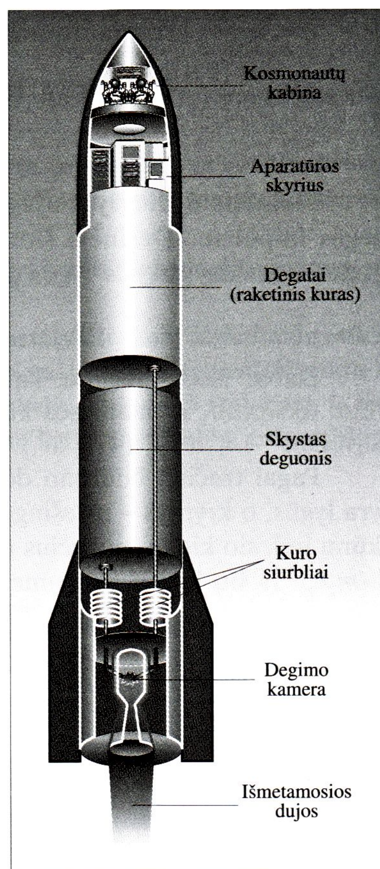
Pagal šį dėsnį galima apskaičiuoti kūnų sąveikos rezultatą nežinant veikiančių jėgų verčių.

Iš patirties žinome, kad kūno impulso tvermės dėsnis neleidžia žmogui pakelti savęs aukštyn paėmus už plaukų, nes sistemos (šiuo atveju žmogaus) vidinės jėgos negali priversti jo judėti. Žmogus ima judėti tik atsispyręs ar įsikibęs į ką nors, bet tuomet jis nustoja būti uždara sistema.

Maudydamiesi vonioje stebime, kaip dušo rankenėlė, paleidus vandenį, juda priešinga vandens srovei kryptimi; pripūstas vaikiškas balionėlis, paleistas neužrištas, skrajoja, tarsi turėtų variklį; stovint ant riedučių ir išmetus sviedinį, nuriedama į priešingą pusę. Tie, kurie esate pabuvoję šaudykloje, gerai žinote, kad šūvio metu parako dujos kulką išstumia pirmyn, o šautuvą tokia pačia jėga stumteli atgal. Tai – *reaktỹviojo judė́jimo* pavyzdžiai. **Reaktyviúoju** (lot. *reactio* – priešingas veiksmas, atoveikis) **vadinamas variklis, kurio trauką sukelia ištekanti skysčio ar dujų srovė.** Raketos, reaktyvieji lėktuvai, kosminiai laivai – visi šie įvairūs skriejimo aparatai yra varomi reaktyviųjų variklių.

Kaip pavyzdį išnagrinėsime reaktyviojo variklio veikimą. 48 paveiksle parodyta principinė raketos konstrukcijos ir veikimo schema. Raketinio variklio kurą sudaro dviejų komponentų – degalų (žibalo, skysto vandenilio) ir oksidatoriaus (skysto deguonies) – mišinys. Degalai ir oksidatorius, įpurkšti į degimo kamerą, kurioje temperatūra siekia iki 5000 °C, sprogsta, ugnis dideliu greičiu išsiveržia pro reaktyviąją tūtą, o reakcijos jėga sukuria raketos traukos jėgą (iki $2 \cdot 10^7$ N).

Ištuštėjusios kuro talpos tampa nereikalingu balastu, todėl raketos konstruojamos keleto pakopų: sudegus kurui, pakopos atjungiamos ir išmetamos.



48 pav.

Raketinis variklis nenaudoja iš aplinkos oro deguonies, todėl tinka skraidyti beorėje, tarpplanetinėje erdvėje – kosmose. Jo traukos jėgą lemia judesio kiekio tvermės dėsnis, nes raketa ir

jos variklio išmetamos dujos sąveikauja. Pagal judesio kiekio tvermės dėsnį, sąveikaujančių kūnų judesio kiekių vektorinė suma išlieka pastovi. Prieš pradedant veikti varikliui, raketos apvalkalo ir kuro judesio kiekis lygus nuliui. Įjungus variklius, raketos ir išmetamų dujų judesio kiekių vektorinė suma taip pat turi būti lygi nuliui: $m_d\vec{v}_d + m_a\vec{v}_a = 0$, arba $m_a\vec{v}_a = -m_d\vec{v}_d$. Iš šios lygties randame apvalkalo greitį:

$$\vec{v}_a = -\frac{m_d}{m_a}\vec{v}_d. \qquad (69)$$

Minuso ženklas parodo, kad išlėkdamas iš variklio sudegęs kuras įgyja priešingos krypties judesio kiekį negu raketos apvalkalas, todėl sudegęs kuras ir raketa juda skirtingomis kryptimis: raketa – aukštyn, sudegęs kuras – žemyn.

Iš 69 lygties galime daryti išvadą, kad raketos apvalkalo greitis didėja didėjant išmetamų dujų greičiui ir didėjant kuro bei apvalkalo masių santykiui. Pavyzdžiui, kad apvalkalo greičio modulis būtų keturis kartus didesnis už dujų čiurkšlės greitį, kuro masė turi būti tiek pat kartų didesnė už apvalkalo masę, t. y. starto metu apvalkalas turi sudaryti vieną penktadalį visos raketos masės. O juk kaip tik apvalkalas yra „naudinga“ raketos dalis.

Kinijoje dar prieš Kristaus gimimą karo tikslams buvo naudojamos parako raketos, kitaip dar vadintos „ugnies strėlėmis“.

1650 m. Raseinių apskrityje gimęs lietuvis artilerijos inžinierius Kazimieras Semenavičius veikale „Didysis artilerijos menas“ apibendrino tuo metu žinomas parako raketas, o kartu paskelbė ir savo išradimus, tarp jų – kelių pakopų raketą. Savo knygoje jis iškėlė daugiapakopės raketos ir raketinės artilerijos idėją, pateikė trijų pakopų raketos brėžinius, apžvelgė raketų gamybos technologiją.

Idėją panaudoti raketas kosminiams skridimams XX a. pradžioje pasiūlė įžymus rusų mokslininkas Konstantinas Ciolkovskis. Jo idėją įgyvendino buvusios SSRS mokslininkai, vadovaujami akademiko Sergejaus Koroliovo.

1957 m. spalio 4 dieną buvusioje SSRS buvo paleistas pirmasis dirbtinis Žemės palydovas, o 1961 m. balandžio 12 d. į Žemės orbitą pirmą kartą pakilo žmogus – Jurijus Gagarinas. Jis kosminiu laivu „Vostok“ pirmą kartą žmonijos istorijoje apskriejo Žemę.

1969 m. liepos 21 d. amerikiečių astronautai N. Armstrongas ir E. Oldrinas nusileido Mėnulyje, pargabeno į Žemę Mėnulio grunto pavyzdžius.

Šiuo metu JAV, Rusijos ir kitų šalių kosminiai aparatai tiria Venerą, Marsą, Saturno žiedus, atlieka mokslinius tyrimus Žemės orbitoje.

Jeigu uždara sistema (paprasčiausiu atveju – vienas kūnas) sukasi, tai jai galioja judesio kiekio momento tvermės dėsnis.

Judesio kiekis apibūdina slenkamąjį judėjimą, o judesio kiekio momentas – sukamąjį judėjimą. **Jùdesio kiẽkio momentù vadinama judesio kiekio ir atstumo iki sukimosi ašies sandauga**, – panašiai kaip jėgos momentas yra jėgos ir jos peties sandauga. **Judesio kiekio momento tvermės dėsnis išreiškia sukamojo judėjimo pastovumą, neveikiant išorinėms jėgoms.**

Su šiuo dėsniu dažnai susiduriame praktikoje: jeigu, sukdamiesi ištiestomis rankomis, jas staiga pritrauksime prie liemens, tai pradėsime suktis greičiau. Kū-

nui prisispaudus prie sukimosi ašies, o judesio kiekio momentui nekintant, kūno sukimosi greitis išauga. Šis dėsnis paaiškina, kodėl, kometoms artėjant prie Saulės, jų greitis didėja, o tolstant – mažėja.

Šio amžiaus pradžioje vokiečių matematikė ir fizikė Emė Nėter (*Noether*) įrodė, kad tvermės dėsniai yra susiję su bendromis erdvės ir laiko savybėmis. Energijos tvermės dėsnis galioja todėl, kad laikas yra vienalytis, t. y. visi laiko momentai lygiateisiai: bet koks fizikos reiškinys šiuo metu vyksta taip pat, kaip ir Niutono laikais. Kūno impulso momento tvermės dėsnis išplaukia iš **erdvės vienalytiškumo: fizikos reiškiniai vyksta vienodai (esant toms pačioms sąlygoms) bet kurioje erdvės vietoje.** Pagaliau, remiantis judesio kiekio tvermės dėsniu, daroma išvada, kad *Visatoje visos kryptys yra lygiavertės.*

Priminsime elementariosios dalelės – neutròno – atradimo istoriją. Tam išsiaiškinkime, kaip susiduria du stangrūs rutuliukai. Tarkime, kad rutuliukų masės yra m_1 ir m_2, o jų greičiai prieš smūgį – $\vec{v}_1$ ir $\vec{v}_2$. Pabandykime įvertinti rutuliukų greičius po smūgio $\vec{v}_1{}'$ ir $\vec{v}_2{}'$. Pritaikę rutuliukams judesio kiekio ir energijos tvermės dėsnius, gauname dviejų lygčių sistemą su dviem nežinomaisiais:

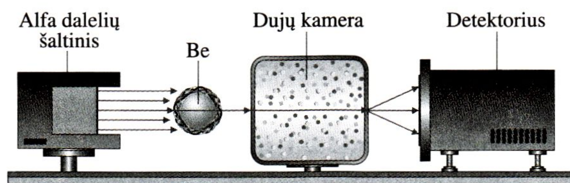
$$\begin{cases} m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_1{}' + m_2\vec{v}_2{}', \\ \dfrac{m_1v_1^2}{2} + \dfrac{m_2v_2^2}{2} = \dfrac{m_1(v_1{}')^2}{2} + \dfrac{m_2(v_2{}')^2}{2}. \end{cases}$$

Kairėse lygybių pusėse yra abiejų rutuliukų judesio kiekiai ir kinetinės energijos prieš susidūrimą, o dešinėse pusėse – po susidūrimo.

Kad būtų paprasčiau nagrinėti, tarkime, kad antrasis rutuliukas prieš susidūrimą buvo rimtyje $(\vec{v}_2 = 0)$, o smūgis yra centrinis. Išsprendę lygčių sistemą, nustatome, kad po smūgio pirmojo ir antrojo rutuliukų greičiai yra: $\vec{v}_1{}' = \dfrac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}\vec{v}_1$ ir $\vec{v}_2{}' = \dfrac{2m_1}{m_1 + m_2}\vec{v}_1$. Iš šių formulių matyti, kad, susiduriant vienodos masės rutuliukams ($m_1 = m_2$), pirmasis rutuliukas po smūgio sustoja $(\vec{v}_1{}' = 0)$, o antrasis juda pirmojo rutuliuko greičiu $(\vec{v}_2{}' = \vec{v}_1{}')$.

Šitokį ganėtinai paprastą sprendimą 1932 m. anglas Dž. Čedvikas (*Chadwick*) pritaikė naujai elementariajai dalelei atrasti. Jis pastebėjo, kad, bombarduojant lengvąjį metalą berilį alfa dalelėmis (helio branduoliais), iš berilio išlekia kažkokios nežinomos, neturinčios elektrinio krūvio dalelės (49 pav.).

Išskyręs šių dalelių pluoštelį pro siaurą plyšį šaltinį gaubiančiame ekrane, Čedvikas tyrė jų susidūrimus su vandenilio branduoliais, o paskui – su azoto branduoliais. Dvejopų susidūrimų prireikė todėl, kad Čedvikas nežinojo naujųjų dalelių masės ir jų greičių. Buvo žinoma tik tiek, kad jie gerokai viršija dujų molekulių greičius, todėl pastarųjų branduolius buvo galima laikyti nejudan-



49 pav.

čiais ($v_2 = 0$). Smūgių metu branduolinės reakcijos nevyko, todėl susiduriančias daleles buvo galima nagrinėti kaip stangrius rutuliukus ir taikyti anksčiau gautas lygtis. Padalijus $\vec{v}_H'$ – vandenilio branduolio greitį po susidūrimo su nežinomąja dalele iš $\vec{v}_N'$ – azoto branduolio greičio po susidūrimo su ja, nežinomosios dalelės greitis susiprastina ir gaunama tokia išraiška: $\frac{\vec{v}_H'}{\vec{v}_N'} = \frac{m + 14m_H}{m + m_H}$. Čia atsižvelgta į tai, kad azoto branduolio masė yra 14 kartų didesnė už vandenilio branduolio masę.

Čedvikas išmatavo, kad, smogus nežinomai dalelei, vandenilio branduoliai įgaudavo vidutiniškai 7,5 karto didesnį greitį negu azoto branduoliai. Įrašęs šią reikšmę į aukščiau pateiktą formulę, mokslininkas nustatė, kad nežinomosios dalelės masė yra maždaug lygi vandenilio branduolio masei.

Už šį atradimą, praėjus trims metams po jo paskelbimo, Dž. Čedvikui buvo suteikta Nobelio fizikos premija.

Klausimai ir užduotys

1. Einant išilgai valties, plūduriuojančios vandenyje, ji ima judėti į priešingą pusę. Kodėl?

2. Berniukas, sėdėdamas kėdėje su ratukais ir neliesdamas kojomis grindų, bando pervažiuoti per kambarį. Ar jam pavyks tai padaryti?

3. Raketa gali greitėti ne tik ore, bet ir beorėje kosminėje erdvėje, kur nėra į ką atsispirti. Ar tai neprieštarauja kūno impulso tvermės dėsniui?

4. Berniukas ir jo tėvas, stovėdami ant ledo su pačiūžomis, atsistumia vienas nuo kito. Kiek kartų didesnį greitį įgis berniukas negu jo tėvas, kurio masė du kartus didesnė?

5. Vežimėlis, kurio masė 200 g, važiuodamas 2 m/s greičiu, pavijo dvigubai masyvesnį vežimėlį, važiuojantį 1 m/s greičiu, ir sukibo su juo. Kokiu greičiu toliau važiuos abu vežimėliai?

6. Šilumvežis, kurio masė 130 t, 2 m/s greičiu priartėja prie nejudančio 1170 t masės sąstato. Kokiu greičiu judės sąstatas, sukabintas su šilumvežiu?

7. Kamuolys, skriejęs statmenai į sieną 20 m/s greičiu, atšoko nuo jos 18 m/s greičiu. Kamuolio masė 800 g, o smūgio trukmė 0,02 s. Koks vidutinis smūgio jėgos didumas?

8. Kulka, kurios masė 10 g, išlekia iš automato vamzdžio 300 m/s greičiu. Automatas per minutę iššauna 200 kartų. Kokia vidutine jėga jis slegia šaudančiojo petį?

9. 200 kg masės plaustas plaukia 2 m/s greičiu. Ant plausto statmenai jo judėjimo krypčiai 4 m/s greičiu užšoka 80 kg masės žmogus. Kokiu greičiu ir kuria kryptimi pradeda plaukti plaustas su žmogumi?

10. Du netamprūs rutuliai, kurių masės 4 kg bei 2 kg, rieda vienas prieš kitą 6 m/s ir 4 m/s greičiu. Kokiu greičiu jie judės po absoliučiai netampraus smūgio? Koks būtų jų greitis, jeigu jie judėtų viena kryptimi ir vienas paskui kitą?

11. Medžiotojas šauna iš valties. Medžiotojo ir valties bendra masė 100 kg, šratų masė 40 g, vidutinis pradinis šratų greitis 400 m/s. Šautuvo vamzdis šūvio metu su vandens paviršiumi sudaro 60° kampą. Kokį greitį įgyja valtis šūvio momentu?

5 SKYRIUS. MECHANINIAI SVYRAVIMAI IR BANGOS

23. Bendrosios harmoninių svyravimų charakteristikos

Mechãniniu svyrãvimu vadinamas periodiškai pasikartojantis materialiojo taško (ar kūno) judėjimas ta pačia trajektorija pakaitomis į priešingas puses. Taip juda prie siūlo pritvirtintas rutuliukas, pakabintas ant svyruoklės pasvaras, virpa stygos, membranos, svyruoja vandens lygis susisiekiančiuose induose ar jūrose ir t. t. Visiems šiems judesiams būdingi bendri dėsningumai, kurie išreiškiami analogiškomis lygtimis ir išvadomis. Svyruojamajam judėjimui (svyravimui) vykti būtinos trys sąlygos:

1) kad kūnas pradėtų svyruoti, jo pradinė energija turi būti didesnė už energiją kūnui būnant pusiausvyros padėtyje (todėl kūną reikia išjudinti);

2) kad kūnas svyruotų, jį turi veikti į pusiausvyros padėtį grąžinanti jėga;

3) kad kūnas svyruotų ilgą laiką, svyravimo energija neturi mažėti.

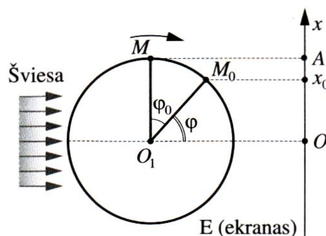
Visi gamtoje sutinkami svyravimai klasifikuojami pagal šiuos požymius: 1) pagal veikiančių jėgų (F) pobūdį – *laisvíeji ir priverstìniai*; 2) pagal svyravimo periodo (T) pastovumą – *periòdiniai ir neperiòdiniai*; 3) pagal svyravimo amplitudę – *neslopìnamieji ir slopìnamieji* ir 4) pagal analitinę išraišką – *harmòniniai ir neharmòniniai*.

Harmoninius svyravimus apibūdiname dvejopai: a) **tai svyravimai, kurie vyksta, kai kūną veikianti jėga $(\vec{F})$ yra tiesiog proporcinga to kūno nuokrypiui (atsilenkimui) ir nukreipta pusiausvyros padėties link** (dinaminė apibrėžtis): $F = -kx$; b) **tai svyravimai, kuriuos apibūdinantys fizikiniai dydžiai (koordinatė x, greitis v, pagreitis a ir kt.) laikui bėgant kinta pagal kosinuso (ar sinuso) dėsnį** (kinematinė apibrėžtis). Remiantis harmoninio svyravimo apibrėžimu ir kosinuso (sinuso) matematine samprata, svyruojančio kūno judėjimo (svyravimo) lygtis užrašoma taip:

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0); \tag{70}$$

čia x – kūno nuokrypis nuo pusiausvyros padėties, ω – svyravimų kampinis dažnis, t – laikas. Harmoninius svyravimus išnagrinėsime išsamiau, pasitelkdami tokį modelį (50 pav.).

Brėžinio plokštumoje pastoviu kampiniu greičiu ω besisukantį rutuliuką M, nutolusį nuo centro O_1 atstumu A, apšviečiame iš kairės lygiagrečiu spindulių pluoštu ir stebime rutuliuko šešėlio slankiojimą ekrane E. Šešėlio padėtis pradiniu laiko momentu ($\angle M_0O_1M = \varphi_0$), t. y. atstumas iki taško O, apie kurį svyruoja šešėlis, yra $x = A\cos\varphi_0$. Sukantis rutuliukui (kampui $\angle M_0O_1O$ didėjant dydžiu $\varphi = \omega t$), jo šešėlio koordinatė ekrane keisis dėsningai pagal 70 lygtį.



50 pav.

Vadinasi, rutuliuko šešėlis ekrane judės harmoningai. Iš 70 formulės matyti, kad didžiausio nuokrypio nuo pusiausvyros padėties taško O vertė yra lygi A. Ji vadinama **svyrãvimų amplitudè. Tai fizikinis dydis, apibūdinantis didžiausią svyruojančio kūno (taško) nuokrypį nuo pusiausvyros padėties.** Sinuso (kosinuso) argumentas, laiko t funkcija $(\omega t + \varphi_0)$, vadinama *svyrãvimo fazè. Tai fizikinis dydis, apibūdinantis kūno padėtį ir judėjimo kryptį tam tikru laiko momentu:*

$$\varphi = \omega t + \varphi_0; \tag{71}$$

čia φ_0 – pradinė svyravimų fazė (pradiniu laiko momentu, kai $t = 0$). **Laikas, per kurį rutuliukas M apskrieja apskritimą (50 pav.), arba kuris atitinka pilno svyravimo trukmę, vadinamas periodù (T).** Todėl svyravimams apibūdinti galime pritaikyti jau žinomas (žr. §10) formules dažniui ir periodui apibrėžti: $f = \frac{N}{t}$ ir $T = \frac{t}{N}$; čia N – svyravimų skaičius, o t – svyravimo laikas. Be to, periodas ir dažnis yra vienas kitam atvirkštiniai dydžiai $\left(T = \frac{1}{f}\right)$, todėl, žinodami svyravimo periodą, nesunkiai apskaičiuojame dažnį ir atvirkščiai.

Tarkime, kad kūnas (taškas) harmoningai svyruoja išilgai koordinačių ašies Ox pagal dėsnį $x = A \cos \omega t$. Nustatykime, kaip jo greitis ir pagreitis priklauso nuo laiko. Žinome, kad kūno greitis $\upsilon_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, o greičio projekcija υ_x nusakoma koordinatės x išvestine laiko atžvilgiu:

$$\upsilon_x = x'(t) = -A\,\omega \sin \omega t = A\,\omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \tag{72}$$

Iš šios formulės matyti, kad narys $A\,\omega$ yra greičio amplitudinė reikšmė υ_m:

$$\upsilon_m = A\,\omega. \tag{73}$$

Norint apskaičiuoti kūno pagreičio projekcijas bet kuriuo laiko momentu, reikia rasti greičio projekcijos υ_x išvestinę laiko t atžvilgiu:

$$a_x = \upsilon_x'(t) = -A\,\omega^2 \cos \omega t = A\,\omega^2 \cos(\omega t + \pi), \tag{74}$$

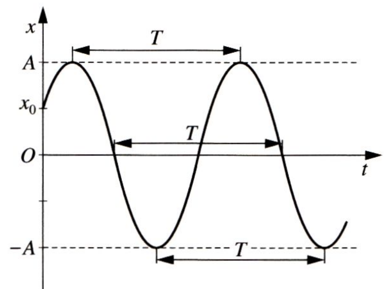
$$\text{o} \quad a_m = A\,\omega^2. \tag{75}$$

Iš 72 ir 74 lygčių matome, kad harmoningai svyruojančio kūno (taško) greitis ir pagreitis, kaip ir koordinatė, kinta pagal kosinuso arba sinuso dėsnį. Bendriausiu atveju svyravimo lygtis užrašoma taip:

$x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$ arba

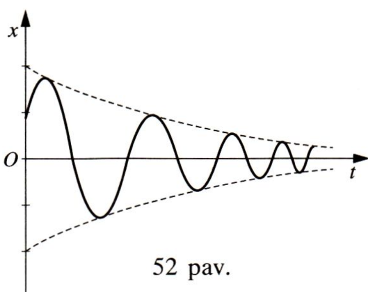
(kai $\varphi_0 = 0$) $x = A \cos \omega t$ (76),

o jos grafikas yra kosinusoidė (51 pav.).



51 pav.

Veikiant trinties ir pasipriešinimo jėgoms, svyruojančio kūno amplitudė mažėja. Toks svyravimas vadinamas *slopìnamuoju*. Jo grafikas pavaizduotas 52 paveiksle.



52 pav.

Praktinėje veikloje dažnai susiduriame su tamprumo jėgos veikiamo kūno judėjimu. Tokių svyravimų pavyzdžiu gali būti ant plieninės spyruoklės pakabinto pasvaro arba stygos judėjimas. Stebėdami prie spyruoklės pritvirtinto *m* masės rutuliuko judėjimą (53 pav.), bandykime išsiaiškinti, kaip kinta to kūno koordinatė (poslinkis) *x*, kai jį veikia tik spyruoklės tamprumo jėga $F_{\text{tampr}} = -kx$; čia *k* – spyruoklės tamprumas.

Iš 74 ir 76 lygčių gauname, kad

$$a_x = -\omega^2 x. \tag{77}$$

Iš pastarosios lygties matome, kad išilgai *Ox* ašies svyruojančio kūno pagreitis tiesiogiai proporcingas kūno poslinkiui *x*. Taikydami antrąjį Niutono dėsnį harmoningai svyruojančiam *m* masės kūnui, kai jį veikia tik tamprumo jėga, gauname:

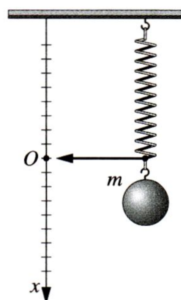
$$a_x = \frac{(F_{\text{tampr}})_x}{m} = -\frac{k}{m}x. \tag{78}$$

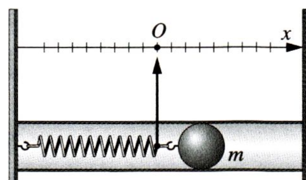
Pertvarkę 77 ir 78 lygtis, gauname ryšį tarp tamprumo jėgos veikiamo kūno kampinio dažnio ω, deformuojamo kūno standumo *k* bei kūno masės *m*:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad \text{arba} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \tag{79}$$

Prisiminus kampinio dažnio ir periodo ryšio formulę (žr. §10; lygtis 21) ir palyginus ją su 79 formule, gaunama tamprumo jėgos veikiamo kūno svyravimo periodo (*T*) lygtis:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \tag{80}$$





53 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Išvardykite bent penkis harmoninių svyravimų pavyzdžius iš mus supančios aplinkos.

2. Kurie svyravimą apibūdinantys dydžiai kinta periodiškai?

3. Jei kūno svyravimų dažnis išaugo du kartus, kaip pasikeitė jo periodas?

4. Materialusis taškas per 1 min susvyravo 300 kartų. Apskaičiuokite jo svyravimo periodą.

5. Plieninės stygos taško laisvųjų svyravimų amplitudė 1 mm, dažnis 1 kHz. Kokį kelią nueis tas taškas per 0,2 s?

6. Kiek kartų pakis automobilio supimosi ant lingių dažnis pakrovus krovinį, kurio masė prilygsta tuščio automobilio masei?

7. Kokioms fazėms esant, svyruojančio kūno nuokrypis nuo pusiausvyros padėties yra lygus pusei amplitudės?

8. Automobilio „VW Jetta“ variklio cilindre stūmoklis 66 mm atstumą tarp kraštutinių padėčių nueina per $3 \cdot 10^{-3}$ s. Laikydami, kad stūmoklis juda pagal harmoninio kitimo dėsnį, apskaičiuokite didžiausią jo judėjimo greitį.

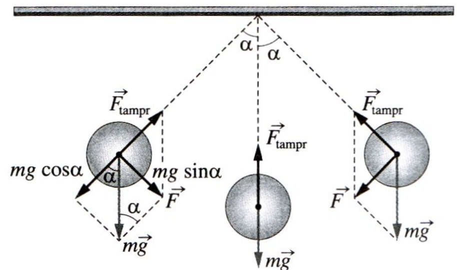
9. Prikabinus 1 kg masės pasvarą, pusiausvira plieninė spyruoklė pailgėjo 1 cm. Kokiu periodu svyruos šis pasvaras, išjudintas vertikaliai iš pusiausvyros padėties?

24. Matematinė svyruoklė

Mažas kūnas, pakabintas ant netąsaus siūlo, kurio masė, palyginti su kūno mase, yra maža, vadinamas matemãtine svyruoklè. Tokios svyruoklės pavyzdys – švininis rutuliukas, pakabintas ant ilgo netąsaus siūlo (54 pav.). Rutuliuką veikiančios sunkio $\vec{F}$ ir siūlo tamprumo $\vec{F}_{\text{tampr}}$ jėgos atsveria viena kitą, todėl jų atstojamoji lygi nuliui ir kūnas kabo vertikalioje padėtyje. Tokia padėtis vadinama *pusiáusvyros padėtimì*.

Iš 54 paveikslo matome, kad, atitraukus svyruoklę kampu α nuo pusiausvyros padėties, atsiranda tamprumo ir sunkio jėgos atstojamoji $\vec{F}$, nukreipta į pusiausvyros padėtį. Jos veikiamas rutuliukas juda su pagreičiu link pusiausvyros padėties.

Kampu α atlenktoje nuo pusiausvyros padėties svyruoklėje susidaro dvi sunkio jėgos dedamosios: statmena judėjimo krypčiai jėga, lygi $mg \cdot \cos\alpha$, suteikia rutuliukui normalinį pagreitį, o jėga, lygi $mg \cdot \sin\alpha$, suteikia jam tangentinį pagreitį, nukreiptą pusiausvyros padėties link.



54 pav.

Kai kampas α mažas, tai $\sin\alpha \approx \frac{x}{l}$. Tada galime teigti, kad tokios matematinės

svyruoklės judėjimo pagreitis yra tiesiogiai proporcingas poslinkiui nuo pusiausvyros padėties:

$$a_x = -\frac{g}{l}x; \tag{81}$$

čia l – svyruoklės ilgis, x – nuokrypis nuo pusiausvyros padėties, g – laisvojo kritimo pagreitis.

Remiantis antruoju Niutono dėsniu, svyruoklę grąžinanti jėga $F_{\text{grąž}} = -\frac{mg}{l}x$, t. y. ji proporcinga nuokrypiui x nuo pusiausvyros padėties. Vadinasi, matematinės svyruoklės svyravimas yra harmoninis ir iš 77 bei 81 lygčių randame apytikslę matematinės svyruoklės svyravimo kampinio dažnio ω vertę:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}, \tag{82}$$

o jos svyravimo periodą iš lygties $T = \frac{2\pi}{\omega}$ išreiškiame taip:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \tag{83}$$

Akivaizdu, kad matematinės svyruoklės svyravimo periodas, kai kampas α mažas, nepriklauso nei nuo svyravimo amplitudės, nei nuo masės; jis proporcingas kvadratinei šakniai iš jos ilgio l ir atvirkščiai proporcingas kvadratinei šakniai iš laisvojo kritimo pagreičio g.

Svyruoklės svyravimo periodo priklausomybė nuo laisvojo kritimo pagreičio taikoma, kai reikia tiksliai išmatuoti laisvojo kritimo pagreitį įvairiose Žemės paviršiaus vietose. Remiantis matavimo rezultatais, galima nustatyti naudingų iškasenų – geležies rūdos, naftos, dujų – telkinių vietą.

Klausimai ir užduotys

1. Kaip pasikeis svyruoklės svyravimo periodas, sutrumpinus pakabą keturis kartus?

2. Ar pasikeis sūpynių svyravimo periodas, ant jų lentos padėjus krovinį?

3. Kaip du kartus padidinti ant ilgo siūlo pakabinto mažo rutuliuko svyravimo periodą?

4. Kaip pasikeis svyruoklės svyravimo periodas, pakeitus jos pasvarą perpus mažesnės masės pasvaru?

5. 1 m ilgio matematinės svyruoklės svyravimo amplitudė lygi 3 cm. Apskaičiuokite kraštinėse padėtyse ir pusiausvyros padėtyje esančios svyruoklės tangentinį pagreitį.

6. Kokia yra matematinės svyruoklės pasvarą veikiančių jėgų atstojamosios kryptis, kai: a) pasvaras eina per pusiausvyros padėtį; b) pasvaras yra kraštinėse padėtyse? Nubraižykite brėžinius ir paaiškinkite.

7. Matematinė svyruoklė, kurios ilgis 2,45 m, per 314 s susvyruoja 100 kartų. Nustatykite svyruoklės svyravimo periodą ir laisvojo kritimo pagreitį toje vietovėje.

8. Matematinė svyruoklė, nukreipta nuo pusiausvyros padėties, svyruoja 5 cm amplitude ir per 1 min susvyruoja 120 kartų. Parašykite svyruoklės harmoninio svyravimo lygtį.

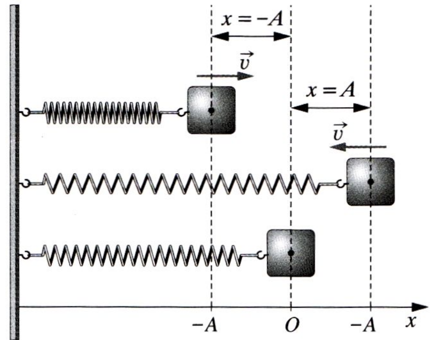
9. Kūnas sužadinamas svyruoti trumpu stumtelėjimu iš pusiausvyros padėties. Kokia amplitude jis svyruoja, jeigu fazę, kuri lygi $\frac{\pi}{6}$ rad, atitinka 6 cm poslinkis?

10. Per kiek laiko harmoningai svyruojanti svyruoklė nukryps nuo pusiausvyros padėties per pusę amplitudės, jeigu jos svyravimo periodas 6 s, o pradinė fazė lygi nuliui?

25. Svyruojančio kūno energija

Kaip ir bet kurio kito judėjimo (kūnų sąveikos) metu, harmoningai svyruojančio kūno pilnutinė energija turėtų būti lygi jo kinetinės ir potencinės energijų sumai ir bet kuriame svyruojančio kūno trajektorijos taške išlikti pastoviu dydžiu: $W = W_k + W_p = \text{const}$. Kad tai įvertintume, prisiminkime prie spyruoklės prikabinto pasvaro judėjimą veikiant tamprumo jėgai (žr. § 19, 21 ir 23).

Kaip žinome, ištemptos arba suspaustos spyruoklės energija lygi $\frac{kx^2}{2}$; čia k – spyruoklės tamprumo (standumo) koeficientas, x – jos nuokrypis nuo pusiausvyros padėties. 55 paveiksle pavaizduoto kūno svyravimą nagrinėsime laisvai pasirinktos atskaitos sistemos Ox atžvilgiu. Kai kūnas yra kraštinėje (viršutinėje) padėtyje, tai spyruoklės pailgėjimas $x = -A$, o sistemos potencinė energija šiame taške $W_p = k\frac{A^2}{2}$. Šiuo momentu sistemos kinetinė energija lygi nuliui, nes toje padėtyje kūno greitis lygus nuliui. Vadinasi, šioje padėtyje sistemos pilnutinė mechaninė energija bus lygi potencinei energijai: $W = W_p = \frac{kA^2}{2}$.



55 pav.

Tarkime, kad svyravimo sistemos neveikia jokia trinties jėga, o visos kitos jėgos viena kitą kompensuoja. Todėl nagrinėjama sistema – uždara kūnų sistema, kurios pilnutinė mechaninė energija judėjimo metu kisti negali. Šitaip samprotaudami, įsitikiname, kad svyruojančiam kūnui atsidūrus apatinėje kraštinėje padėtyje (kai $x = A$), jo kinetinė energija lygi nuliui, o pilnutinė mechaninė energija vėl lygi potencinei energijai. Uždaros sistemos pilnutinė mechaninė energija pakisti negalėjo. Vadinasi, kūnas nuo pusiausvyros padėties žemyn turėjo nukrypti lygiai tokiu pačiu atstumu A, kaip ir į viršų.

Kūnui pereinant pusiausvyros padėtį, jo potencinė energija lygi nuliui, nes $x = 0$ (nėra deformacijos). Vadinasi, pilnutinė mechaninė energija šioje padėtyje

bus lygi jo kinetinei energijai: $W = W_k = \frac{mv_m^2}{2}$; šioje lygtyje m – kūno masė, v_m – kūno greitis (pusiausvyros padėtyje jis yra didžiausias ir *vadinamas maksimaliúoju greičiù* arba *greĩčio amplitudè*).

Logiška manyti, kad sistemos, kurioje svyravimai vyksta tik tamprumo jėgos veikiami, kraštutinės padėties potencinė energija lygi jos kinetinei energijai pusiausvyros padėtyje:

$$\frac{kA^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2}. \qquad (84)$$

Pastaroji lygtis patvirtina teiginį, kad svyruojančio kūno potencinė energija periodiškai virsta kinetine, o kinetinė – potencine ir t. t. Šis procesas tęsiasi tol, kol kūnas svyruoja. Bet kuriame kitame taške (tarp pusiausvyros ir kraštinių padėčių) kūnas turi potencinės ir kinetinės energijos, kurių suma sudaro pilnutinę mechaninę energiją. Šie virsmai atitinka mechaninės energijos tvermės dėsnį. Todėl harmoninio svyravimo pilnutinė energija nekinta ir visą laiką yra lygi

$$W = \frac{kA^2}{2}. \qquad (85)$$

Taigi **svyruojančio kūno pilnutìnė enèrgija priklauso tik nuo svyravimo amplitudės ir sistemos tamprumo.**

Iš energijos tvermės dėsnio (84) gauname svyruojančio kūno amplitudės ir maksimalaus jo greičio santykio formulę:

$$\frac{A^2}{v_m^2} = \frac{m}{k} \quad \textit{arba} \quad \frac{A}{v_m} = \sqrt{\frac{m}{k}}. \qquad (86)$$

Klausimai ir užduotys

1. Kuriuose trajektorijos taškuose svyruojantis kūnas turi tik potencinės energijos ir kuriuose – tik kinetinės energijos?

2. Pilnutinė svyruojančio kūno energija yra pastovus dydis (laikui bėgant nekinta). Ar galima tai pasakyti apie kinetinę ir potencinę energiją? Atsakymą pagrįskite.

3. Ar priklauso pilnutinė mechaninė svyruojančio kūno energija nuo jo masės? Atsakymą pagrįskite.

4. Kam lygi pilnutinė svyruojančio kūno energija bet kuriame trajektorijos taške?

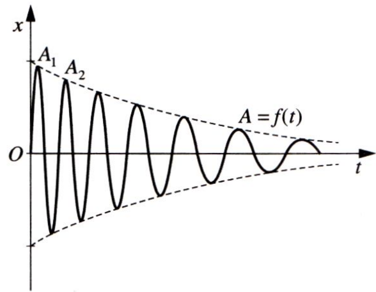
5. Ar greitis, kuriuo svyruoklė pereina pusiausvyros padėtį, priklauso nuo svyravimo amplitudės? Kodėl?

6. 0,4 kg masės pasvaras, pritvirtintas prie 250 N/m standumo spyruoklės, harmoningai svyruoja horizontalioje plokštumoje 15 cm amplitude. Apskaičiuokite pilnutinę mechaninę svyravimo energiją ir didžiausią pasvaro greitį. Trinties nepaisykite. Kaip pakistų pilnutinė mechaninė energija, jeigu atsižvelgtume į trintį?

7. 10 g masės materialiojo taško svyravimas apibūdinamas lygtimi $x = 0{,}05 \sin(0{,}6t + 0{,}8)$. Apskaičiuokite didžiausią tą tašką veikiančią jėgą ir pilnutinę svyravimo energiją.

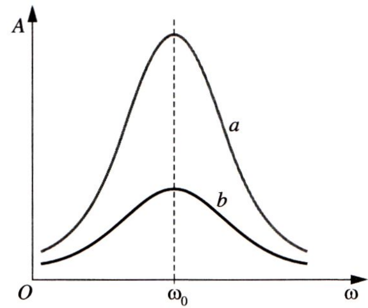
26. Priverstiniai svyravimai. Rezonansas

Ankstesniuose paragrafuose nagrinėjome svyravimus, kurių svyravimų amplitudė nesikeitė. Tačiau realiai svyruojantį kūną veikia pasipriešinimo jėgos, trintis, todėl amplitudė A nuolat mažėja. **Svyravimai, kurių metu dėl trinties ir pasipriešinimo jėgų mažėja svyravimo amplitudė, vadinami slopìnamaisiais arba sil̃pstančiaisiais svyrãvimais.** Slopinamojo svyravimo grafikas pavaizduotas 56 paveiksle.



56 pav.

Svyravimų mažėjimo sparta priklauso nuo svyruojančio kūno savybių, jo masės, aplinkos pasipriešinimo ir t. t. Laisvieji svyravimai, kurie vyksta neveikiant slopinimo jėgoms, vadinami *savaĩsiais svyrãvimais*, o jų dažnis – *savúoju dažniù*. Slopinančioje aplinkoje svyravimo dažnis visada yra mažesnis. Kad svyravimai nesloptų, svyruojančios sistemos energija turi būti papildyta iš išorės. Tai gali atlikti išorinė (pašalinė) jėga, sistemos atžvilgiu atlikdama darbą. Ji dažnai dar vadinama *priverstìnė jėgà*.



57 pav.

Svyravimai, kurie vyksta sistemą veikiant periodinei išorìnei – priverstìnei jėgai, vadinami priverstìniais svyrãvimais. Pavyzdžiui, priverstinius svyravimus atlieka vidaus degimo variklių stūmokliai, telefonų membranos ir t. t.

Kai kūno savasis svyravimo dažnis sutampa su išorinės jėgos veikimo dažniu, labai išauga svyravimo amplitudė. Toks reiškinys vadinamas *rezonánsu*.

Tolygiai didindami išorinės jėgos, veikiančios svyruoklę, dažnį, pastebėsime, kad svyravimų amplitudė didėja. Didžiausią reikšmę ji pasiekia tada, kai išorinės jėgos dažnis susilygina su savuoju svyravimų sistemos dažniu ($\omega = \omega_0$). Toliau didinant priverstinės jėgos dažnį ω, svyravimų amplitudė A vėl ima mažėti. 57 paveiksle pavaizduoti amplitudės A priklausomybės nuo dažnio ω grafikai. Šios kreivės vadinamos *rezonánsinėmis*.

Rezonansui didelės reikšmės turi sistemoje veikianti trinties jėga. Kuo ši jėga mažesnė, tuo labiau išauga priverstinių svyravimų amplitudė rezonanso metu. 57 paveiksle kreivė *a* vaizduoja mažesnės trinties atvejį, o kreivė *b* – didesnės trinties jėgos atvejį. Kai dažniai sutampa, tai tamprumo jėga ir priverstinė jėga tam tikrais momentais veikia viena kryptimi (jos sudedamos) ir jų veikimas sustiprėja. Svyravimų amplitudė didėja, kai veikia nors ir nedidelė priverstinė jėga, nes pastaroji jėga prie tamprumo jėgos prisideda kas periodą.

Rezonansas naudingas tuo atveju, kai, veikiant mažoms jėgoms, gaunama daug kartų padidėjusi svyravimų amplitudė. Bet kartais jis gali būti net ir pavojingas. Pavyzdžiui, ant pamato stovi veikianti mašina, kurios atskiros dalys periodiškai juda. Tie judesiai persiduoda pamatui, ir šis pradeda priverstinai svyruoti. Pamatas

taip pat yra svyravimų sistema, turinti savąjį dažnį. Jei šis dažnis sutaps su mašinos dalių svyravimo dažniu, pamato svyravimo amplitudė gali staigiai padidėti ir pamatas sugrius.

Rezonanso reiškinys taikomas mechanikoje, radiotechnikoje, akustikoje, optikoje ir kitur. Tačiau jis gali būti ir laivų, lėktuvų, mašinų, tiltų, pastatų suirimo priežastimi. Vadinasi, visur, kur jis naudingas, jį bandoma sukelti, o ten, kur jo poveikis yra neigiamas, stengiamasi išvengti katastrofiškų jo pasekmių.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname priverstiniais svyravimais? Kokiomis sąlygomis jie vyksta? Koks yra priverstinių svyravimų dažnis?

2. Nešamas ant virvės kilpos kabantis krovinys. Esant tam tikrai žingsniavimo spartai, nešulys gali smarkiai įsisiūbuoti. Kodėl?

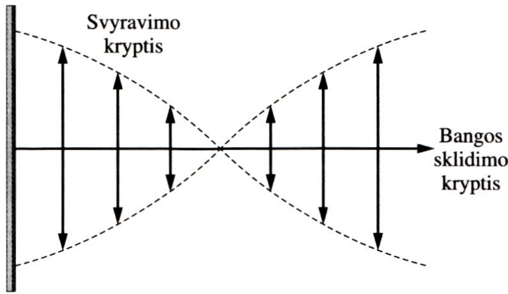
3. Vairuotojas du kartus važiavo tuo pačiu duobėtu keliu (duobės jame buvo išsidėsčiusios apytiksliai vienodais atstumais viena nuo kitos): vieną kartą tuščiu automobiliu, kitą kartą – pakrautu. Palyginkite greičius, kuriais važiavo automobilis, kai jo lingės ėmė svyruoti rezonansiniu dažniu.

27. Svyravimų sklidimas tampriosiomis aplinkomis. Skersinės ir išilginės bangos

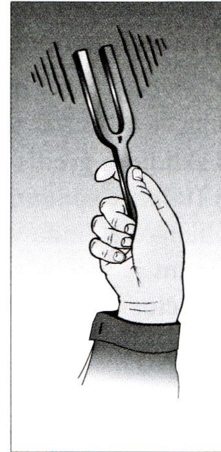
Kiekvienas stebėjote, kaip apie įmestą į vandenį akmenuką koncentriniais apskritimais sklinda vandens ratilai. Jeigu vieną virvutės galą įtvirtinsime, o už kito timptelsime, tai virvute nusklis banga. Būdami prie jūros matėte, kaip banguoja jos vandens paviršius, daugelis, tikiu, stebėjote, kaip vėjuotą dieną banguoja nenupjautų javų ar linų plotai, ir pan. Įdomu yra tai, kad javų ir linų stiebai stovi vietoje: jie tik palinksta – atsitiesia, vėl palinksta – atsitiesia ir t. t. Pučiant smarkiam, gūsingam vėjui, analogiškai svyruoja medžiai, aukšti pastatai ir t. t.

Kietuosius, skystuosius ir dujinius kūnus galima laikyti aplinka, sudaryta iš atskirų dalelių, sąveikaujančių viena su kita ryšio jėgomis. Tokia aplinka fizikoje dažnai vadinama *tampriąja aplinkà*. Kai kūnas svyruoja tampriojoje aplinkoje, tai jis priverčia svyruoti greta esančias daleles, o šios savo ruožtu – tolesnes daleles ir t. t. Dėl sąveikos su kaimyninėmis dalelėmis aplinkoje atsiranda deformacijos ir su jomis susijusios jėgos, kurios priverčia svyruoti visas kaimynines daleles. Toks **svyravimų sklidimas tampriąja aplinka vadinamas mechãnine bangà.** Aplinkos dalelės svyruoja griežtai apie vieną padėtį, vadinamą pusiausvyros padėtimi. Kadangi svyruojančios aplinkos dalelės savo vietos medžiagoje nekeičia, *bangos medžiagos neperneša, tačiau sklisdamos aplinka perduoda energiją iš vieno aplinkos taško į kitą*.

Virvute arba vandens paviršiumi sklindančios bangos dalelės svyruoja statmenai jos sklidimo krypčiai. **Bangos, kurių dalelės svyruoja statmenai bangos sklidimo krypčiai, vadinamos skersìnėmis bangomìs** (58 pav.). Dėl to aplinkoje atsiran-



58 pav.



59 pav.

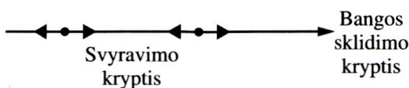
da *ìškylos* ir *įdubos*. Skersinės bangos sklinda tik kietaisiais kūnais, kuriuose deformacijos metu atsiranda tamprumo jėgos, ir skysčių paviršiumi, nes veikia skysčio paviršiaus įtempimo jėga.

Ne visas erdvėje sklindančias bangas galime pamatyti, pvz., sudavę plaktuku per vieną kamertono šakutę, girdime garsą, nors jokių bangų ore nematome. Garso pojūtį sukelia periodiškai kintantis oro slėgis. Virpėdama kamertono šakutė periodiškai slegia ir retina prie jos esantį orą. Toks suslėgtas ir išretėjęs oras sklinda erdvėje į visas puses tolygiai, sudarydamas garso bangas (59 pav.).

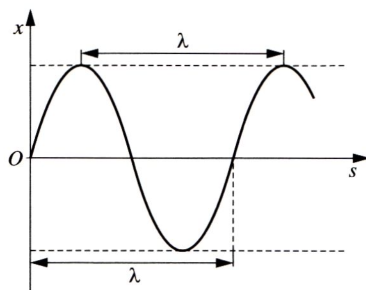
Sklindant garso bangai, aplinkos dalelės svyruoja išilgai svyravimų sklidimo krypties ir bangoje susidaro tarsi dalelių sutankėjimai ir praretėjimai. **Bangos, kurių dalelės svyruoja išilgai bangos sklidimo krypties, vadinamos išilgìnėmis bangomìs** (60 pav.). Tokios bangos sklinda dujomis, skysčiais bei kietaisiais kūnais.

Svyravimų sklidimo greitis erdvėje vadinamas bangõs greičiù. Jis žymimas raide $\vec{v}$.

Mažiausias atstumas tarp gretimų skersinės bangos iškylų ar įdubų bei tarp gretimų bangos sutankėjimų ar praretėjimų vadinamas bangõs ilgiù (61 pav.). **Jį galima apibrėžti ir kaip atstumą tarp dviejų artimiausių taškų, svyruojančių**



60 pav.



61 pav.

vienodomis fazėmis. Bangos ilgis žymimas λ (lámbda). Žinant bangos sklidimo greitį v ir svyravimų periodą T (arba dažnį f), bangos ilgį galime išreikšti sąryšiu

$$\lambda = vT \text{ arba } \lambda = \frac{v}{f}. \quad (87)$$

Bangos sklidimo greitis priklauso tik nuo tampriosios aplinkos fizikinių savybių ir sąlygų (tankio, spūdumo, temperatūros, dujų rūšies). Todėl ta pačia aplinka mechaninės bangos sklinda vienodu greičiu nepriklausomai nuo svyravimo dažnio. Bangai pereinant iš vienos aplinkos į kitą, dalelių svyravimo dažnis išlieka pastovus, o sklindančios bangos ilgis pakinta proporcingai jos greičiui:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (88)$$

Šioje lygtyje λ_1, v_1 – pirmosios aplinkos dydžiai, λ_2, v_2 – antrosios aplinkos dydžiai.

Klausimai ir užduotys

1. Kas yra banga? Kokios yra bangos sklidimo sąlygos?
2. Kuriose aplinkose gali susidaryti ir sklisti skersinės bangos? išilginės bangos?
3. Ką vadiname bangos ilgiu?
4. Kokie yra skersinių ir išilginių bangų skirtumai ir panašumai?
5. Kuo skiriasi banga nuo svyravimo?
6. Berniukas sukelia bangas, periodiškai kaišiodamas lazdos galą į vandenį. Kaip keičiasi bangos ilgis, jei berniukas tai daro dažniau?
7. Sėdėdamas ant jūros kranto, poilsiautojas apskaičiavo, kad per 1 minutę atsirito 12 bangų. Atstumas tarp bangų viršūnių apie 15 metrų. Kokiu greičiu juda bangos?

28. Garso bangos ir jų savybės

Fizikos dalis, nagrinėjanti garso reiškinius, vadinama akùstika, o reiškiniai, susiję su garso bangų susidarymu ir sklidimu, – akùstiniais reiškiniaĩs.

Garsą sukelia garso šaltinis, nesunkiai nustatomas gana tobulu garso registravimo prietaisu – ausimis. Garso šaltinyje visada kas nors virpa arba svyruoja. Pavyzdžiui, mušant būgną, virpa jo oda aptraukti šonai. Šonui išsipūtus, oras suspaudžiamas – taip susidaro aplinkos oro molekulių sutankėjimas. Būgno šonui įlinkus į vidų, aplinkos oras išretėja. Dėl oro molekulių sąveikos tie sutankėjimai ir išretėjimai sklinda tolyn nuo būgno, panašiai kaip spyruoklės vijų sutankėjimai ir išretėjimai. Akivaizdu, kad garso bangos yra išilginės bangos. Joms sklindant, bet kuriame bangos sklidimo taške kinta oro tankis ir slėgis.

Įprastomis sąlygomis garsus girdime ore. Tačiau, pasinėrę į vandenį ar priglaudę ausį prie geležinkelio bėgio ar sienos, įsitikinsime, kad garsas sklinda tiek skysčiais, tiek ir kietaisiais kūnais. Pastarieji kur kas geriau negu dujos praleidžia

garsą, kadangi jų molekulės išsidėsčiusios arčiau viena kitos, o sąveikos jėgos tarp tų dalelių yra gerokai stipresnės.

Garsas tuštuma, arba vakuumu, sklisti negali. Tai buvo įrodyta XVII a. išradus oro siurblį. Padėjus po stikliniu gaubtu laikrodį ir išsiurbus iš gaubto didesnę dalį oro, tiksėjimo nesigirdi.

Klausydamiesi paukščių čiulbėjimo, šunų lojimo, o ir šaukdami žmogų, esantį už kelių šimtų metrų, įsitikiname, kad garsas sklinda baigtiniu greičiu. Garso greitis ore nustatomas pagal tokią apytikslę formulę:

$$v \approx 331 + 0{,}6\,t; \qquad (89)$$

čia t – oro temperatūra.

Iš šios lygties matome, kad, esant oro temperatūrai 0 °C, garso greitis lygus 331 m/s, o temperatūrai kylant, jis nežymiai didėja.

Kaip jau minėjome, dujų tankėjimai ar išretėjimai sklinda dėl to, kad susiduria dujų molekulės. Vadinasi, *garso sklidimo greitis dujose apytiksliai lygus molekulių šiluminio judėjimo greičiui*. Temperatūrai mažėjant, šiluminio judėjimo greitis mažėja, o tuo pačiu mažėja ir garso sklidimo greitis, pvz., nukritus vandenilio temperatūrai nuo 300 K iki 17 K, garso greitis sumažėja nuo 1300 m/s iki 320 m/s. Išmatuota, kad vandenyje garso greitis lygus 1500 m/s, o pliene – 6000 m/s.

Eksperimentinis garso sklidimo greičio nustatymas XVII a. tapo svarbiu įvykiu plėtojant akustiką.

29. Fizikinės garsų charakteristikos

Žmonės nuo seno garsus apibūdina garso aukščiu, stipriu, tembru – charakteristikomis, kurios paremtos mūsų pojūčiais. Fizikams įvedus tikslias garso bangų charakteristikas – *dãžnį, stìprį, kampìnį dãžnį*, paaiškėjo, kad jos atitinka fiziologines charakteristikas, nors pastarosios kartu atspindi ir mūsų klausos ypatumus. Atitikimas nėra vienodas įvairioms bangoms, nes žmogaus ausis nevienodai jautriai jas registruoja.

Garso bangų intervalas buvo nustatytas taip, kad apimtų visus žmogaus girdimus garsus. Todėl garsais vadiname išilgines bangas, kurių dažnis yra nuo 20 Hz iki 20 000 Hz (dažnis hercais (Hz) nurodo bangų skaičių, praeinančių pro bet kokį tašką jų kelyje per vieną sekundę). Bangos, kurių dažnis didesnis negu 20 kHz, vadinamos *ultragarsù*, o bangos, kurių dažnis mažesnis negu 20 Hz, – *infragarsù*. Pavyzdžiui, šunys girdi ultragarso bangas, kurių dažnis siekia 50 000 Hz, o šikšnosparniai girdi net 100 000 Hz dažnio bangas. Iš pateiktų duomenų lengva apskaičiuoti, kad garso bangų ilgis kinta nuo keliolikos metrų ligi maždaug vieno centimetro.

Garso dažnį atitinka jo *aũkštis*. Aukštų garsų dažnis yra didelis, o žemų garsų – mažas. Mūsų suvokiamas garso aukštis šiek tiek priklauso ir nuo jo stiprio: stipresnis garsas atrodo žemesnis negu to paties dažnio silpnesnis garsas.

Gar̃so stìpris, arba *intensyvùmas, apibrėžiamas kaip energija, kurią perneša banga per laiko vienetą pro ploto vienetą, statmeną bangos sklidimo krypčiai.* Kitaip

tariant, stipris – tai garso energija, kuri per laiko vienetą pakliūva į ausies ploto vienetą.

Žmogaus girdimų garsų intensyvumo intervalas labai platus – nuo 10^{-12} W/m^2 iki 1 W/m^2. Stipresni negu 1 W/m^2 garsai sukelia skausmą ir gali pažeisti ausis. Tuo tarpu vos girdimų garsų stipris 10^{-12} W/m^2 yra labai mažas. Jeigu tokio garso dažnis yra 1000 Hz, tai didžiausias oro molekulių poslinkis bangoje sudaro tik apie 10^{-10} m (mažesnis dydis negu atomo skersmuo).

Kadangi mūsų girdimų garsų intensyvumo kitimo ribos labai plačios, tai A. Belas (*Bell*), žinomas kaip telefono išradėjas, garso stiprį pasiūlė matuoti girdimumo ribos atžvilgiu logaritminiais vienetais – *decibèlais* (dB). Garso stipris decibelais apskaičiuojamas pagal formulę

$$\beta = 10\lg\left(\frac{J}{J_0}\right); \qquad (90)$$

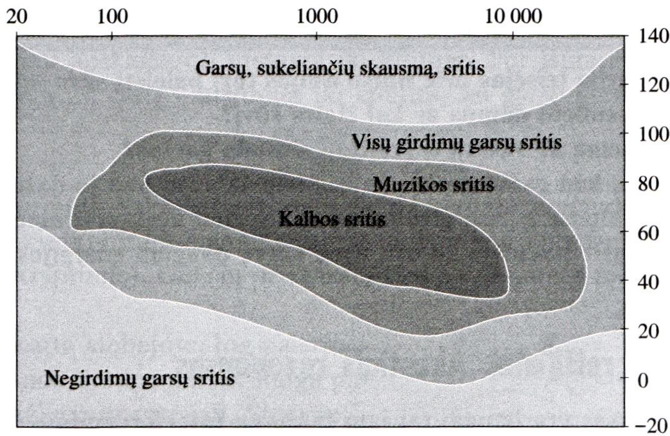
čia J – nagrinėjamo garso stipris; J_0 – vos girdimo garso stipris, lygus 10^{-12} W/m^2. Minimalaus garso stipris lygus 0 dB. Garsui sustiprėjus 10 kartų, jo stipris padidėja 10 dB. Įvairių garsų stipris decibelais pateiktas 3 lentelėje.

3 lentelė

Įvairių šaltinių skleidžiamų garsų palyginimas

Garso girdimumas	Garso stipris (dB)	Garso šaltinis
Vos girdimas	10 – 20	Kvėpavimas, laikrodžio tiksėjimas, lapų šlamėjimas, šnabždesys.
Silpnas	30 – 40	Biblioteka, tylus pokalbis.
Vidutiniškas	50 – 60	Įstaigos triukšmas, pamoka klasėje, pokalbis.
Stiprus	70 – 80	Vidutinio eismo gatvė, draugų kompanija, garsiakalbis, gamykla.
Labai stiprus	90 – 100	Intensyvaus eismo gatvė, pneumatinis kūjis.
Kurtinantis	110 – 120	Mechaninė gamykla, roko muzika uždaroje patalpoje, artimas griaustinis.
Skausmingas	130 – 140	Reaktyvinis lėktuvas, artilerija.

Jeigu garsas nuo šaltinio sklinda visomis kryptimis, tai jis silpsta proporcingai atstumo nuo šaltinio kvadratui $\left(J \sim \frac{1}{r^2}\right)$, nes tokiu būdu didėja apie šaltinį apibrėžiamos sferos plotas. Tas dėsningumas negalioja garsiakalbiams ar megafonams, kurių garsas nukreipiamas viena kryptimi.



62 pav.

Garsus pagal jų dažnį ir stiprį galime išskirti į kalbos, muzikos, triukšmų ir kt. sritis (62 pav.).

Žmogui bendrauti su kitais žmonėmis užtenka tik nedidelės dalies girdimų kalbos srities garsų. Muzikos garsų sritis gerokai platesnė. Trečioji sritis – tai visų girdimų garsų sritis. Apatinė jos riba atitinka girdimumo slenkstį, o viršutinė riba – garsų, sukeliančių skausmą ausyse, slenkstį. Matome, jog viršutinė ir apatinė girdimumo ribos gerokai priklauso nuo garsų dažnio. Pasirodo, kad 0 dB stiprio garsus žmogus girdi tik labai siaurame dažnių intervale, o 20 Hz garsų negirdės, net jei jų stipris sieks 60 dB. Ausiai pavojingiausi maždaug 6000 Hz stiprūs garsai.

Girdimumo sritis siaurėja žmogui senstant. Ypač pablogėja aukštų garsų girdimumas: nustojama girdėti aukštesnius negu 10 000 Hz ir net dar mažesnio dažnio garsus.

4 lentelė

Žmogaus garso parametrai

Įprastų pokalbių dažnių diapazonas:	
• vyrų	85 - 200 Hz
• moterų	160 - 340 Hz
Apytikslis balso stygų virpesių skaičius dainuojant:	
• bosu	80 - 350 Hz
• baritonu	110 - 400 Hz
• tenoru	130 - 520 Hz
• sopranu	260 - 1050 Hz
• diskantu	280 - 1100 Hz
Dainininko balso stygų ilgis:	
• boso	≈ 2,5 cm
• tenoro	1,7 – 2 cm
• soprano	≈ 1,5 cm
Garso greitis kūno audiniuose	1530 - 1600 m/s

Klausimai ir užduotys

1. Kada varžybų teisėjas prie finišo linijos turi paleisti savo sekundometrą – kai pamatys starto pistoleto dūmus ar kai išgirs šūvį?

2. Kada – žiemą ar vasarą – greičiau sklinda garsas?

3. Kas įrodo, kad garso greitis beveik nepriklauso nuo jo dažnio?

4. Kodėl patalpose garsai girdimi daug stipriau negu atvirame lauke?

5. Garso stipris padidėjo 20 dB. Kiek kartų daugiau energijos pakliūva į ausį?

30. Garso reiškiniai. Akustinis rezonansas

Kadangi garsas yra banga, tai jam būdinga **interferenčija – susilpnėjimas ar sustiprėjimas įvairiose vietose aplink du vienodas garso bangas skleidžiančius šaltinius.** Jeigu pasistatome du radijo imtuvus, suderintus tos pačios stoties bangai, nenustojame tam tikrose vietose girdėti radijo garsų. Taip yra todėl, kad interferencija galima tik tada, kai į tą patį tašką ateina dvi vienodo dažnio bangos, o jų fazių skirtumas laikui bėgant, nesikeičia. Radijo imtuvas skleidžia įvairaus dažnio bangas, ir tas garsų mišinys, laikui bėgant, labai greitai keičiasi. Garsų interferenciją galima stebėti naudojant *kamertòną* (žr. 59 pav.), kuris skleidžia vieno dažnio bangas. Sukdami suvirpintą kamertoną netoli ausies, pastebime, kad jo garsas tai stiprėja, tai pasidaro visai arba beveik negirdimas. Mat dvi kamertono šakutės skleidžia vienodas bangas, kurios viena kitą silpnina ten, kur oro sutankėjimas susideda su oro išretėjimu, ir stiprina, kur susideda du sutankėjimai arba du išretėjimai.

Nuolat susiduriame su garso bangų užlinkimu už kliūties, arba *difrãkcija*: girdime kitame kambaryje kalbančius žmones, nors jų ir nematome. Taip gali užlinkti tik bangos. Jeigu garso šaltinis skleistų ne bangas, bet tam tikras mažas daleles, tai girdėtume tik tada, kai tarp ausies ir šaltinio nebūtų jokios kliūties.

Garso banga, sklisdama kuria nors aplinka, anksčiau ar vėliau pasiekia jos ribą, už kurios prasideda kita aplinka, susidedanti iš kitokių dalelių. Joje ir garso greitis bus kitoks. Tokioje riboje įvyksta garso bangos *atspindỹs*. Šis reiškinys vyksta todėl, kad svyravimai, kurie drauge su banga pasiekia dviejų aplinkų ribą, yra perduodami antrosios aplinkos dalelėms, ir jos pačios virsta naujos garso bangos šaltiniu. Toji antrinė banga sklinda ne tik antrąja, bet ir pirmąja aplinka, iš kurios atėjo pirminė banga – tai ir yra atsispindėjusi banga.

Atskiras garso atspindžio atvejis yra *áidas*. Iš šaltinio garsas sklinda iki kažkokios kliūties (toji kliūtis suprantama kaip dviejų aplinkų riba), atsispindi nuo jos ir grįžta atgal į atsiradimo vietą. Jeigu pirminis ir atsispindėjęs garsas pasiekia klausytoją ne vienu metu, tai jis girdi garsą du kartus. Garsas gali atsispindėti keletą kartų. Tuomet jis girdimas daug sykių (griaustinio dundėjimas).

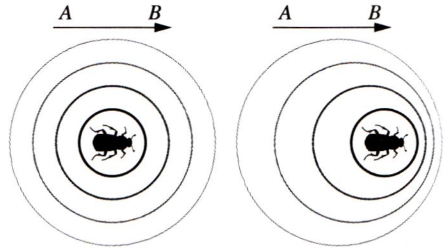
Aido reiškiniu pagrįstas atstumo iki įvairių daiktų buvimo vietos nustatymas. Tarkime, kad tam tikras garso šaltinis pasiuntė garso signalą ir užfiksavo jo pasiuntimo momentą. Garsas, sutikęs kažkokią kliūtį, atsispindėjo nuo jos, grįžo atgal ir

pateko į garso imtuvą. Išmatavus laiko tarpą tarp signalo pasiuntimo ir jo grįžimo momentų, nesunku apskaičiuoti atstumą iki kliūties. Per išmatuotą laiką t garsas nuėjo atstumą, lygų $2s$; čia s – atstumas iki kliūties. Jei garso greitis $\bar{v}$ žinomas, tai

$$s = \frac{vt}{2}. \qquad (91)$$

Pagal šią formulę galima rasti atstumą iki signalo atspindėtojo. Tačiau dar reikia žinoti, kokia kryptimi signalas turėjo sklisti, kad sutiktų kliūtį (garsas juk sklinda visomis kryptimis). Dėl šių priežasčių tam naudojamas ne paprastas garsas, bet ultragarsas.

Turbūt ne kartą stebėjote, jog gaisrinės ar policijos mašinos sirenos garsas staiga pažemėja jai pravažiuojant pro šalį. Šiam reiškiniui suprasti išnagrinėkime bangas, kurias sukelia į vandenį įkritęs vabalas (63 pav.).



63 pav.

Jeigu vabalas monotoniškai judina vandenį vienoje vietoje, tai nuo jo į visas puses sklinda vienodos bangos. Tarkime, jis pradėjo judėti B kryptimi, o jo greitis yra mažesnis už bangos greitį. Vabalas vejasi nuo jo sklindančią bangos keterą B kryptimi ir tolsta nuo bangos keteros, kuri ritasi A kryptimi. Vadinasi, dėl bangų šaltinio judėjimo atstumas tarp keterų B kryptimi sumažėja, o A kryptimi padidėja. Atstumas tarp keterų ir yra bangos ilgis. Jeigu A ir B taškuose du berniukai stebi vabalo sukurtas bangas, tai berniukas, nuo kurio vabalas tolsta, matys didesnio ilgio (mažesnio dažnio) bangas, o berniukas, prie kurio vabalas artėja, matys trumpesnio ilgio (didesnio dažnio) bangas.

Šis reiškinys būdingas visoms bangoms ir vadinamas *Dòplerio efektù*, nes XIX a. pirmasis jį paaiškino austrų fizikas Christianas Dopleris (*Doppler*).

Artėjančios į mus sirenos garsas paaukštėja, o tolstančios nuo mūsų – pažemėja, palyginus su stovinčios sirenos garsu.

Naudodamasis Doplerio efektu, kelių policininkas išmatuoja pravažiuojančio automobilio greitį. Į automobilį nukreipus radijo bangą ir išmatavus atsispindėjusios bangos dažnį, pagal jo pokytį pradinio dažnio atžvilgiu galime nustatyti automobilio greitį.

Garso bangos nešami svyravimai gali būti ta periodiškai kintanti priverstinė jėga, kuri, veikdama svyravimo sistemas, sukelia *akùstinį rezonánsą*, t.y. verčia jas skambėti.

Jau esame minėję, kad grynieji tonai (vieno dažnio garsai) išgaunami kamertonu. Pats prietaisas skleidžia labai silpną garsą, nes jo svyruojančių šakučių paviršiaus plotas nedidelis ir svyravimai perduodami tik nedaugeliui oro dalelių. Todėl kamertonas dažniausiai pritvirtinamas prie rezonatoriaus medinės dėžutės, parinktos taip, kad savasis jos svyravimų dažnis būtų lygus kamertono skleidžiamo garso dažniui. Dėl rezonanso dėžutės sienelės irgi pradeda svyruoti kamertono dažniu. Jų svyravimo amplitudė yra didelė, dėžutės paviršiaus plotas taip pat daug didesnis

už kamertono paviršiaus plotą, todėl kamertono garsas ganėtinai sustiprėja. Muzikos instrumentuose irgi neišsiverčiama be rezonatorių – įvairių dėklų. Be jų, vien tik stygų sukeliami garsai nebūtų girdimi. Žmogus irgi turi rezonatorių – burnos ertmę, sustiprinančią balso skleidžiamus garsus.

Klausimai ir užduotys

1. Kuo turi skirtis dvi aplinkos, kad jų riboje garsas atsispindėtų?
2. Kas yra aidas?
3. Ką vadiname ultragarsu? Kokia jo savybe pagrįsta garso lokacija?
4. Ką vadiname akustiniu rezonansu?
5. Pašvilpaukite ir pabandykite paaiškinti, kokiu būdu reguliuojate švilpesio aukštį.
6. Didysis tenoras Enriko Karuzo (*Caruso*) sugebėdavo sudaužyti bokalą, sudainavęs visu garsu tam tikrą muzikinį toną. Kokiu reiškiniu pasinaudodavo Karuzo?
7. Stebėtojas yra 85 m atstumu nuo vertikalios uolos. Po kiek laiko jis išgirs savo šūktelėjimo aidą?
8. Ultragarso signalas, atsispindėjęs nuo jūros dugno, grįžo po 1,2 s. Koks yra jūros gylis?
9. Tekant vandeniui į aukštą ritinio formos indą, girdime garsą. Kodėl jis aukštėja pilnėjant indui?

31. Ultragarsas ir jo naudojimas

Mechaniškai virpantys kūnai medžiaginėje aplinkoje sukelia bangas, kurias, kaip jau minėjome, skirstome į infragarsus (virpėjimų dažnis mažesnis negu 20 Hz), girdimus garsus (dažnis 20–20 000 Hz) ir ultragarsus (dažnis nuo $2 \cdot 10^4$ iki 10^{13}–10^{14} Hz). Ultragarsui gauti dažniausiai naudojami metodai, pagrįsti *magnetostrìkciniu* ir atvirkštiniu *pjezoelektriniù – efèktais*. Magnetostrikcinį generatorių sudaro feromagnetinis strypas, įstatytas į solenoidą, kuriuo teka aukšto dažnio kintamoji srovė. Jei strypo savasis dažnis sutampa su kintamosios srovės dažniu, tai strype susidaro rezonansiniai mechaniniai virpesiai. Tuomet išspinduliuojamos žemo dažnio ultragarso bangos, kurių dažnio diapazonas 20–60 Hz. Aukštesniems dažniams gauti naudojami pjezoelektriniai generatoriai, kuriuose pritaikomas atvirkštinis pjezoelektrinis efektas. Generatorių spinduliuojamos ultragarso bangos yra išilginės.

Ultragarsams priimti ir registruoti taip pat naudojami *magnetostrìkciniai ir pjezoelektrìniai imtùvai*. Magnetostrikcinio imtuvo feromagnetinis strypas turi būti toks pats, kaip ir generatoriaus. Ultragarso bangos, pasiekusios šio feromagnetinio strypo galą, deformuoja jį savuoju dažniu, o šios strypo deformacijos imtuvo selenoide sukelia to paties dažnio kintamąją elektrovarą ir elektros srovę, kurią stiprintuvas sustiprina ir perduoda į indikatorių, parodantį, kad ultragarsas priimtas. Pjezoelektriniuose imtuvuose naudojamas tiesioginis pjezoelektrinis efektas.

Trumpos ultragarso bangos, kurių ilgis yra gerokai mažesnis už garso šaltinio matmenis, gali būti išspinduliuojamos siauru pluoštu ir sklinda tam tikra kryptimi (svarbiausia ultragarso bangų savybė yra ta, kad jas iš šaltinio galima skleisti kryptingai. Didelio dažnio ultragarso bangas stipriai absorbuoja dujos, tuo tarpu skysčiuose ir kietuose kūnuose jos gali nusklisti didelius nuotolius. Šios ultragarso savybės yra taikomos *ultragarsìniuose hidrolokãtoriuose* ir *defektoskòpuose*. Hidrolokatoriai naudojami povandeniniams laivams sekti, jūrų gyliui nustatyti, žuvų telkiniams surasti. Ultragarsiniais defektoskopais aptinkami įvairūs defektai stambių detalių viduje.

Ultragarsus skleidžia ir naudoja daugelis gyvų būtybių, pradedant uodais ir baigiant banginiais. Tyrimai parodė, kad šikšnosparniai iš savo snukučio skleidžia ultragarso bangų impulsus, paskui didelėmis jautriomis ausimis įsiklauso į savo „šaukimo" aidą, kuris atsispindi nuo kliūties. Todėl, nors ir blogai matydami, ir nakties metu jie gerai orientuojasi aplinkoje ir neatsitrenkia į kliūtis. Panašiu principu sukonstruoti ultragarsiniai lokatoriai akliesiems. Bitės skleidžia ultragarsus spietimosi metu. Daugelis vabzdžių ir gyvūnų suvokia ultragarsus, pavyzdžiui, naktinės peteliškės, svirpliai, žiogai, pelės, jūrų kiaulytės, šunys. Ultragarsu išbaidomi augalų kenkėjai, uodai, pelės ir pan.

Įvairaus diapazono ultragarsų aptinkama vėjo, jūros bangų, krioklių ūžesiuose, traukinių, lėktuvų (ypač reaktyvinių) triukšme.

Stiprios ultragarso bangos gali užmušti kai kuriuos gyvus organizmus, pavyzdžiui, žuveles, buožgalvius, įvairius mikroorganizmus. Ši ultragarso savybė naudojama vandeniui, pienui ir kitiems maisto produktams sterilizuoti. Tačiau kai kuriais atvejais ultragarsu galima ir stimuliuoti gyvybės procesus. Buvo bandyta, parinkus ultragarso dažnį ir dozę, paveikti žirnių, miežių, cukrinių runkelių sėklas. Jos greičiau sudygo, augalai sparčiau vystėsi ir brendo, sutrumpėjo vegetacijos periodas.

Medicinoje ultragarsu aptinkamos ligonio kūno anomalijos (navikai, organų arba jų dalių formos pakitimai ir t. t.), nustatomas susirgimo pobūdis, gydoma daugelis ligų. Juo mažesnis ultragarso bangos ilgis, juo mažesni aptinkamų objektų matmenys.

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl šikšnosparniai ir kolibriai, skraidydami net ir visiškoje tamsoje, už nieko neužkliūva?

2. Kodėl ultragarso generatoriaus kvarcinės plokštelės storis turi būti lygus pusei ultragarso bangos ilgio?

3. Tarpusavio ryšiui palaikyti delfinai skleidžia 10–400 Hz dažnio garsą, o echolokacijai – 750–300 000 Hz dažnio garsą. Kuo paaiškinti tokį garsų skirtumą?

4. Manoma, kad ryklių kuriamas ultragarsas gali užmušti žuvis. Kaip tai paaiškinti?

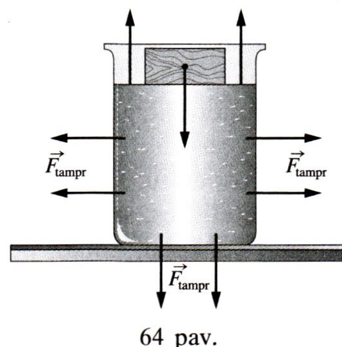
5. Kokius virpesius vadiname ultragarsiniais? Kokio ilgio bangas aliumininiame strype sukelia ultragarso generatorius, kurio kuriamų bangų dažnis 10 MHz? Garso greitis aliuminyje 5100 m/s.

6 SKYRIUS. SKYSČIAI IR DUJOS

32. Mechaninės skysčių ir dujų savybės

Mechanikos dalis, nagrinėjanti skysčių judėjimą veikiant išorinėms jėgoms, vadinama hidrodinãmika. Pagrindiniai hidrodinamikos dėsniai, kuriuos nustatė ir apibendrinta forma išreiškė Oileris (*Euler*), A. Lagranžas (*Legendre*), D. Bernulis (*Bernoulli*), A. Navjė (*Navier*) ir Dž. Stoksas (*Stokes*), tam tikrais atvejais tinka ir dujų judėjimui.

Skysčiai ir dujos nuo kietųjų kūnų pirmiausia skiriasi tuo, kad jie neturi rimties trinties – mažiausia jėga sukelia jų dalelių judėjimą. *Kai skystis yra nesvarus, jis įgauna rutulio formą* (mažiausią paviršiaus plotą, vadinasi, mažiausią paviršiaus energiją). Taip apibūdindami skysčius „idealizuojame". Iš tikrųjų skysčiuose pastebima *vidinė trintìs*, arba *klampùmas*, t. y. tam tikras pasipriešinimas vieniems skysčio sluoksniams pasislenkant kitų atžvilgiu. Tačiau vidinės trinties jėgos nepajėgia išlaikyti pastovios geometrinės skysčio formos – ji priklauso nuo indo formos. Be to, skysčiai beveik nespūdūs, nes išoriniam poveikiui priešinasi jų tamprumo jėgos. Jos visada statmenos sąveikaujantiems paviršiams (64 pav.).



64 pav.

Visi reiškiniai, susiję su klampumu ir spūdumu, apsunkina skysčių judėjimo nagrinėjimą. Teoriškai patogiausia nagrinėti neklampių ir nespūdžių, vadinamųjų *idealių̃jų*, skysčių judėjimą. Dujos pasižymi dideliu spūdumu, tačiau teorija ir eksperimentai rodo, kad, esant nedideliems greičiams, tekančių dujų tūris mažai tekinta ir joms taip pat tinka idealiųjų skysčių judėjimo dėsniai.

Nejudančiame skystyje išorinis slėgis perduodamas į visas puses vienodai.

Slėgį, veikiantį nejudančiame skystyje, vadiname hidrostãtiniu slėgiù.

Prisiminkime slėgio sąvoką. Slėgis matuojamas jėga, kuri veikia paviršiaus ploto vienetą statmena šiam paviršiui kryptimi. Jei paviršiaus plotą S statmena kryptimi veikia pasiskirsčiusi jėga F, tai slėgis

$$p = \frac{F}{S}. \tag{92}$$

Slėgio matavimo vienetas – *paskãlis*: $[p] = \frac{1\,\text{N}}{1\,\text{m}^2} = 1\,\text{Pa}$. Dažnai naudojami kiti slėgio vienetai:

a) *fizikìnė atmosferà*, 1 atm = 1,013 · 10^5 Pa – tai 15 °C oro slėgis arba 10,33 m aukščio vandens stulpo slėgis;

b) *gývsidabrio* (*stulpẽlio*) *milimètras* arba *tòras*, 1 atm = 760 mmHg = 760 tor;

c) *tèchninė atmosferà*, $1\,\text{at} = \frac{9{,}81\,\text{N}}{1\,\text{cm}^2} = 9{,}81 \cdot 10^4$ Pa;

d) *bãras*, 1 bar = 10^5 Pa.

Visi skysčiai turi svorį, todėl hidrostatinį slėgį skysčio viduje sudaro ne tik skysčio paviršių veikiantis išorinis slėgis, bet ir slėgis, kurį sąlygoja paties skysčio svoris. Tarkime, kad į indą, kurio pagrindo plotas S, įpilta skysčio (65 pav.). Indo dugną slegia skysčio stulpelio, kurio aukštis h ir tankis ρ, svoris $P = mg = \rho Vg$, nes tankis $\rho = mV$. Kadangi tūris $V = Sh$, tai $P = \rho Shg$, o stulpelio sudaromas hidrostatinis slėgis

65 pav.

$$p = \frac{P}{S} = \rho gh. \qquad (93)$$

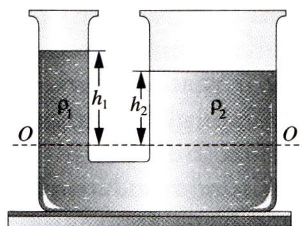
Remiantis 93 formule, daroma išvada, kad hidrostatinis slėgis skystyje yra proporcingas panėrimo gyliui ir pagal Paskalio dėsnį jis perduodamas į visas puses vienodai. Taigi **kuo giliau, tuo slėgis didesnis, ir šis slėgis veikia vienodai visomis kryptimis**.

33. Susisiekiančiųjų indų dėsnis

Du arba keletas indų, sujungtų vienas su kitu, vadinami susisiekiančiaisiais indais.

Susisiekiančiųjų indų stulpelių aukščiai atvirkščiai proporcingi jų tankiams (66 pav.):

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \qquad (94)$$



66 pav.

Aukščiai matuojami nuo skysčių skiriamosios ribos OO. Žemiau jos yra vienalytis skystis, todėl skysčio slėgis ties riba OO abiejuose induose yra vienodas.

Kai skystis induose vienalytis ($\rho_1 = \rho_2$), stulpelių laisvieji paviršiai yra vienodo lygio.

Susisiekiančiųjų indų principu veikia vandentiekio sistema. Podirvio vanduo pasiskirsto žemės sluoksniuose taip pat pagal susisiekiančiųjų indų principą. Pasitaiko, kad vandeniui laidus smėlio ar žvyro sluoksnis dirvožemyje yra apsuptas molio ar mergelio sluoksniu, kuris vandens nepraleidžia. Jei pragręšime dauboje ar kalno pašlaitėje šį nelaidų vandeniui sluoksnį, tai vanduo stipria srove veršis aukštyn. Šiuo principu veikia arteziniai šuliniai.

34. Hidraulinis presas

Hidraulinis presas naudojamas didelėms slėgio jėgoms gauti. Juo presuojamos įvairios medžiagos, keliami kūnai, štampuojamos detalės, spaudžiamos sultys ir t. t. Hidraulinio preso veikimas pagrįstas Paskalio dėsniu. Hidraulinį presą sudaro du skirtingo skersmens susisiekiantys indai su skysčiu (dažniausiai alyva) ir

stūmokliais (67 pav.). Mažesnės jėgos F_1 slėgis $p_1 = \frac{F_1}{S_1}$ skysčiu perduodamas didesnio ploto stūmokliui, kuris sukelia $F_2 = p_2S_2$ dydžio jėgą. Kadangi $p_1 = p_2$, tai

$$F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}. \quad (95)$$

Iš šios lygties matyti, kad gautos jėgos dydis yra $\frac{S_2}{S_1}$ kartų didesnis už veikusios jėgos dydį. S_1 ir S_2 – indų skerspjūvio plotai. Norint pasiekti reikiamo dydžio jėgą F_2, procesas kartojamas naudojant vožtuvą V_1. Vožtuvas neleidžia alyvai vėl grįžti į siaurąją šaką. Taip kūnas pakeliamas į norimą aukštį ir suslegiamas.

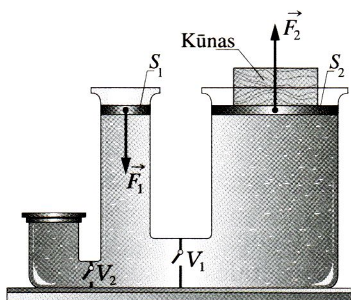
35. Atmosferos slėgis. Toričelio bandymas

Žemę gaubiantis oras (atmosfera) slegia visus kūnus. Atmosferos slėgį išmatavo italų fizikas ir matematikas Evandželista Toričelis (1608–1647), kuris 1644 m. sukūrė atmosferos slėgio teorijos pagrindus. Jis pripylė gyvsidabrio į 1 m ilgio vamzdelį, kurio vienas galas užlydytas. Atvirą galą užspaudęs pirštu, vamzdelį apvertė ir įstatė į atvirą indą su gyvsidabriu (68 pav.).

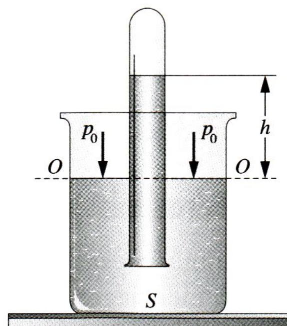
Dalis gyvsidabrio iš vamzdelio išsiliejo. Likusio gyvsidabrio stulpelio aukštis h priklauso tik nuo atmosferos slėgio į atvirą gyvsidabrio paviršių. Kadangi vamzdelis ir indas sudaro susisiekiančiųjų indų sistemą, tai slėgis OO lygyje yra vienodas ir lygus atmosferos slėgiui. Darome išvadą, kad atmosferos slėgis atsveria gyvsidabrio stulpelio slėgį: $p_0 = \frac{m_{Hg}g}{S} = \rho\frac{V_{Hg}g}{S} = \rho gh$. Atmosferos slėgis, kai h = = 760 mm, vadinamas *normaliúoju* ir lygus p_0=101 292,8 Pa=1013 hPa, arba p_0 = = 760 mmHg = 1 atm.

Kylant aukštyn, atmosferos slėgis mažėja (nežymiai keičiantis aukščiui nuo Žemės paviršiaus, vidutiniškai kas 10 m slėgis pakinta maždaug 111 Pa. Mažėja ir oro tankis. Apatiniame 5 km aukščio sluoksnyje yra pusė visos atmosferos masės. Žemės atmosfera siekia maždaug 10 000 km.

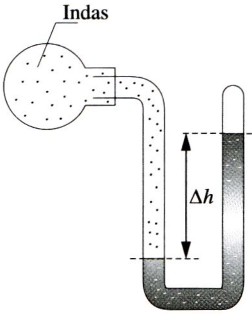
Su atmosferos slėgiu yra susijęs orų kitimas.



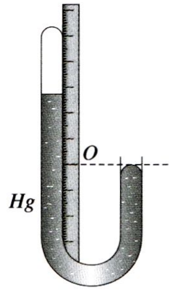
67 pav.



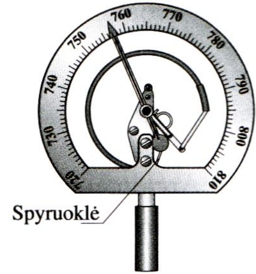
68 pav.



69 pav.



70 pav.



71 pav.

Slėgio pokytis matuojamas *manometrù*. Labai mažas slėgis matuojamas uždaruoju skysčio manometru (69 pav.). Sujungus tokio manometro atvirą galą su mažo slėgio indu, skysčio lygis uždaroje šakoje nukrinta. Išmatavus skysčių lygių skirtumą Δh, galima apskaičiuoti slėgį inde.

Atmosferos slėgis matuojamas *barometrù* (gr. *baros* – sunkumas, *metron* – matas). Paprasčiausias yra Toričelio naudotas gyvsidabrinis barometras. Didėjant atmosferos slėgiui, didėja ir barometro gyvsidabrio stulpelio aukštis. Stulpelio aukštis matuojamas vertikalioje milimetrinėje skalėje (70 pav.).

Metalinis barometras *aneròidas* (71 pav.) patogesnis už gyvsidabrinį, bet ne toks tikslus. Vakuuminio plonasienio vamzdelio išorinio paviršiaus plotas didesnis už vidinio paviršiaus plotą. Dėl to, atmosferos slėgiui didėjant, vamzdelis sulinksta, jo galai artėja vienas prie kito ir pasuka juos jungiančią spyruoklę, o kartu ir rodyklę.

36. Archimedo dėsnis. Kūnų plūduriavimas

Į skystį (arba dujas) panardintą kūną veikia jėga, nukreipta vertikaliai aukštyn, kurios skaitinė vertė lygi kūno panirusios dalies išstumto skysčio (dujų) sunkiui. Ši jėga vadinama Archimèdo jėgà:

$$F_A = \rho_{sk(d)} g V_k; \tag{96}$$

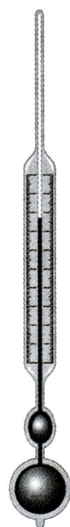
šioje formulėje $\rho_{sk(d)}$ – skysčio ar dujų tankis; V_k – išstumto skysčio ar dujų tūris, lygus panirusios kūno dalies tūriui.

Jei kūno tankis mažesnis už skysčio tankį ($\rho_k < \rho_{sk(d)}$), tai kūnas, įmestas į skystį, nepasiners, pvz., medinis tašelis vandenyje nugrims tik tiek, kad išstumto skysčio svoris susilygintų su jo paties svoriu.

Esant šiai pusiausvyrai, teigiame, kad kūnas plūduriuoja. Įmetus tą patį kūną į mažesnio tankio skystį, jis nugrims daugiau, nes savo svoriui atsverti turės išstumti didesnį skysčio kiekį. Šią mintį galime apibūdinti ir matematiškai, nes skystyje ar dujose kūnas plūduriuoja, kai jį veikianti keliamoji jėga F_A yra ne mažesnė už jo sunkio jėgą mg, t. y. $F_A \geq mg$, arba $\rho_{sk(d)} V_2 \geq \rho_k V_k$ (V_k – kūno tūris, ρ_k – jo tankis). Kadangi $V_1 + V_2 = V_k \geq V_2$, tai kūno plūduriavimo sąlyga yra: $\rho_{sk(d)} \geq \rho_k$.

Šiuo principu veikia *aeromètrai* – prietaisai skysčio tankiui matuoti. Aerometrą sudaro tuščiaviduris stiklinis indelis (72 pav.), kurio vienas galas pripildytas gyvsidabrio ar švino, o viršuje iš vidaus įtaisyta skalė. Viršutinės jo padalos atitinka mažesnį tankį. Matuojant aerometras laisvai paleidžiamas skystyje. Aerometrai, skirti pieno riebumui matuoti, vadinami *lakomètrais*.

Archimedo jėgos veikimu pagrįstos vandens ir oreivystės transporto priemonės – laivai ir povandeniniai laivai, oro balionai ir t. t.



72 pav.

37. Skysčio slėgio priklausomybė nuo jo tėkmės greičio

Dažnai, norint įvertinti judančio skysčio judėjimą, svarbu žinoti skysčio slėgio p tam tikroje jo tėkmės vietoje, greičio v ir tos vietos aukščio h sąryšį (73 pav.).

Šią priklausomybę 1738 m. nustatė šveicarų fizikas Danielius Bernulis (*D. Bernoulli*; 1700–1782). Matematinė lygties išraiška tokia:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2 = \text{const.} \qquad (97)$$

Visi lygties nariai reiškia slėgį: p – statinį, $\rho g h$ – hidrostatinį, $\frac{\rho v^2}{2}$ – dinaminį. Darome išvadą, kad **idealiojo (neklampaus ir nespūdaus) skysčio statinio, hidrostatinio ir dinaminio slėgių suma bet kuriame tėkmės skerspjūvyje yra pastovus dydis.**

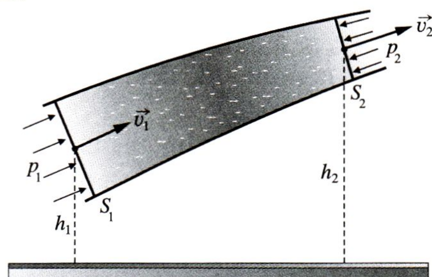
Kai skystis teka horizontaliu vamzdžiu, tai $h_1 = h_2$ ir

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const.} \qquad (98)$$

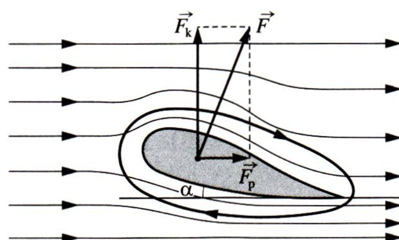
Akivaizdu, kad **slėgis mažesnis tose tėkmės vietose, kur jo greitis didesnis, ir atvirkščiai.** Iš skysčio tėkmės tolydumo lygties

$$Sv = \text{const} \qquad (99)$$

matome, kad **skysčio tėkmės greitis didesnis siauresnėse vietose, nes pro bet kurį skerspjūvio plotą per tą patį laiką visada prateka vienodas idealiojo skysčio kiekis.**



73 pav.



74 pav.

D. Bernulio lygtyje esanti slėgių suma $p+\frac{\rho v^2}{2}$ vadinama *hidráuliniu skýsčio slėgiù*.

Slėgio sumažėjimu siauresnėse vietose pagrįstas vandens srovės siurblių, purkštuvų, injektorių veikimas.

Sparno keliamoji jėga $\vec{F}_k$ atsiranda irgi dėl slėgio sumažėjimo virš sparno (74 pav.). Šalia pagrindinio srauto aplink sparną susidaro papildomas oro srautas. Dėl to oro srauto virš sparno greitis yra didesnis už jo greitį po sparnu. Taip susidaro slėgių skirtumas, o tuo pačiu atsiranda keliamoji jėga.

Tokia jėga veikia ir laivo povandeninius sparnus. Todėl laivas „pakyla“ iš vandens („Raketos“ grimzlė nuo 1,8 m sumažėja iki 1,1 m) ir jis įgyja didelį greitį.

Pasipriešinimo jėgą atsveria lėktuvo ar laivo variklio traukos jėga.

Klausimai ir užduotys

1. Kokios formos indą reikia paimti, kad jo dugną veikianti slėgio jėga būtų lygi skysčio sunkio jėgai? būtų didesnė už sunkio jėgą? būtų mažesnė už sunkio jėgą?

2. Inde, iki viršaus užpildytame vandeniu, plaukioja ledo gabalas. Ar išsipils iš indo vanduo ledui ištirpus?

3. Prie svirtinių svarstyklių prikabinti du rutuliukai – varinis ir aliumininis. Svarstyklės yra pusiausviros. Ar sutriks svarstyklių pusiausvyra, rutuliukus panardinus į vandenį?

4. Ar galioja Paskalio ir Archimedo dėsniai dirbtiniame Žemės palydove?

5. Ar perpiltume vandenį iš vienos stiklinės į kitą dirbtinio Žemės palydovo kabinoje?

6. Kodėl du pakabinti popieriaus lapai susiglaudžia tarp jų pučiant orą?

7. Kodėl lėktuvai kyla arba leidžiasi prieš vėją, o ne pavėjui?

8. Įrodykite, kad dinaminis slėgis $\frac{\rho v^2}{2}$ matuojamas paskaliais (Pa).

9. Kodėl vandens srovė, ištekanti iš vandentiekio čiaupo, į apačią siaurėja?

10. Kodėl, taikant Bernulio lygtį naftotiekiui, daroma paklaida?

11. Plačiąja vamzdžio dalimi vanduo teka 0,1 m/s greičiu. Kokiu greičiu vanduo teka siaurąja vamzdžio dalimi, kurios skersmuo 4 kartus mažesnis?

12. Siaurojoje horizontalaus vamzdžio dalyje vandens greitis 4 m/s, o statinis slėgis 20 N/cm^2. Kokio dydžio statinis, dinaminis ir hidraulinis slėgis bus toje vamzdžio dalyje, kurios skerspjūvio plotas yra du kartus didesnis?

ŠILUMINIAI REIŠKINIAI

Aplinka, kurioje mes gyvename, sudaryta iš makroskopinių kūnų. Mūsų kūnas irgi yra vienas iš jų. **Kūnai, sudaryti iš didelio skaičiaus molekulių ir gerai įžiūrimi plika akimi, vadinami makroskòpiniais kū́nais.** Šių kūnų pavyzdžiais gali būti debesys, arbatos puodelis, sniego gniūžtė, teniso kamuoliukas, virbalas, Mėnulis, Žemės rutulys ir t. t.

Mechanikos skyriuje nagrinėjome makroskopinių kūnų judėjimą, t. y. vienų kūnų padėties kitimą erdvėje kitų kūnų atžvilgiu laikui bėgant bei judėjimą sukeliančias priežastis. Tačiau nesiaiškinome medžiagų sandaros ypatumų, jų agregatinės būsenos kitimo. Nors mechanika ir nagrinėja jėgas, tačiau tamprumo ar trinties jėgų atsiradimui giliau pagrįsti galimybės neturi.

Kad mechanika nepilnai paaiškina daugelį aplink mus vykstančių reiškinių, suprato ir pats jos kūrėjas Niutonas, kuris savo laiku rašė: „Aš nežinau, koks aš atrodysiu pasauliui; man pačiam atrodo, kad buvau tiktai berniukas, kuris žaidė ant jūros kranto ir gėrėjosi retkarčiais rastais vis dailesniais akmenukais arba vis gražesnėmis kriauklėmis negu paprastai, o tuo metu didysis tiesos vandenynas mano buvo visai neįspėtas“.

Be mechaninio judėjimo, su kuriuo ir mes patys esame tampriai susiję, gamtoje ir savo kasdienėje veikloje nuolat stebime reiškinius, kurie vyksta dėl temperatūros kitimo, pvz., debesų susidarymas, ledo tirpimas, rūkas, metų laikų kaita, skysčių garavimas, metalų lydymas ir t. t. Šie reiškiniai vadinami *šilumìniais reiškiniaĩs*. Iš pirmo žvilgsnio atrodytų, kad tuose reiškiniuose nieko stebuklinga nėra, nes mechaniniu požiūriu kūnai nejuda ir nieko ypatinga juose neįžvelgiama.

Ilgą laiką daugelio šalių mokslininkai eksperimentuodami bandė atrasti dėsnius, kurie paaiškintų nejudančių kūnų pokyčius ir tuo pačiu apibūdintų dar vieną materijos judėjimo rūšį – *šilumìnį judė́jimą*, būdingą visiems makroskopiniams kūnams, bet nepriklausantį nuo jų mechaninio judėjimo.

Žinome, kad visi makroskopiniai kūnai sudaryti iš smulkių dalelių – atomų ir molekulių. Tų dalelių judėjimas ir tapusavio sąveika kūnų viduje apibūdina šiluminius reiškinius. *Medžiagos atomai ir molekulės juda netvarkingai*, o toks **molekulių judėjimas vadinamas šiluminiù judėjimu**. Pastarasis išreiškia ypatingą materijos, turinčios specifines savybes, judėjimo formą, kurios dėsningumams įvertinti pasitelkiama šiluminių reiškinių fizika.

Kadangi daugelis šiluminių reiškinių vyksta pagal tam tikrus dėsnius, tai juos atradus buvo galima tuos reiškinius panaudoti ir pritaikyti technikoje. Šiuolaikiniai šiluminiai varikliai, šaldymo, dujų skystinimo ir kiti įrenginiai – akivaizdus šiluminius reiškinius apibūdinančių dėsnių praktinio taikymo pavyzdys.

7 SKYRIUS. MOLEKULINĖS KINETINĖS TEORIJOS PAGRINDAI

Mintį, kad kiekviena medžiaga sudaryta iš smulkiausių nedalomų dalelių – atomų, dar 400 m. pr. Kr. iškėlė senovės graikų filosofai Leukipas ir Demokritas. Jų supratimu, kūnai susidaro susijungus atomams. Kūnų savybių įvairovė paaiškinama tuo, kad kūnai yra sudaryti iš skirtingų atomų arba vienodi atomai yra skirtingai susijungę vieni su kitais erdvėje, t. y. sudaro skirtingus atomų derinius. Visus gamtoje vykstančius kitimus Demokritas aiškino įvairiais tuštumoje vykstančiais judančių atomų susijungimais ir atsiskyrimais. Kūnai mums atrodo vienalyčiai todėl, kad atomai yra be galo maži, plika akimi neįžiūrimi. Tai buvo genialus spėjimas apie medžiagos sandarą, eksperimentais patvirtintas tik po dviejų su viršum tūkstančių metų.

Viduramžiais viešpatavęs Aristotelio mokymas kategoriškai neigė atomų buvimą. Jis teigė, jog „Kiekvieną kūną galima dalyti ir dalyti be galo...“.

Nobelio premijos laureatas R. Feinmanas (*Feynman*) rašė: „Jeigu įvyktų pasaulio katastrofa, per kurią žūtų visos mokslo žinios, ir ateities kartoms būtų galima perduoti tik vieną trumpą sakinį, tai, mano nuomone, tas sakinys būtų šitoks: „Visos medžiagos sudarytos iš mažiausių dalelių – atomų, nuolatos judančių ir traukiančių arba stumiančių vienas kitą priklausomai nuo jų tarpusavio atstumo“. Šiame sakinyje sukauptas neįtikėtinas kiekis mokslinės informacijos apie pasaulį. Jame sutelkta medžiagos sandaros molekulinės kinetinės teorijos esmė.“

Nuo XVII a. pradėta sparčiai plėtoti molekulinę teoriją. Prie šios teorijos raidos XVIII a. viduryje daug prisidėjo didysis rusų mokslininkas Michailas Lomonosovas (1711–1765). Aiškindamas pagrindines dujų savybes, jis teigė, kad visos dujų molekulės juda netvarkingai ir susidurdamos vienos kitas atstumia. Jis pirmasis paaiškino šilumos prigimtį netvarkingu molekulių judėjimu. Kadangi molekulių šiluminio judėjimo greičiai gali būti kiek norima dideli, medžiagos temperatūra, jo manymu, neturi viršutinės ribos, t. y. gali būti labai įvairi. Netvarkingo judėjimo greitį mažinant iki nulio, turėtų būti pasiekiama mažiausia medžiagos temperatūros vertė. Šilumos prigimties aiškinimas, remiantis netvarkingu molekulių judėjimu ir M. Lomonosovo padaryta

išvada, kad egzistuoja absoliučiojo nulio temperatūra, teoriškai ir eksperimentiškai buvo patvirtinta XIX a. pabaigoje, kadangi tokie mokslininkai, kaip italų fizikas ir chemikas Amadeo Avogadras (*Avogadro*), anglų mokslininkas Džonas Daltonas (*Dalton*), Liudvikas Bolcmanas (*Boltzmann*), Albertas Einšteinas (*Einstein*) ir daugelis kitų fizikų moksliškai pagrindė atominę bei molekulinę medžiagos sandarą.

38. Molekulinės kinetinės teorijos teiginiai ir eksperimentinis jų pagrindimas

Molekulinè kinètine teòrija vadinamas mokslas, kuris medžiagos sandarą ir savybes aiškina, remdamasis prielaida, jog egzistuoja atòmai bei molèkulės – mažiausios cheminės medžiagos dalelės.

Dujų savybę neribotai plėstis, dujų, skysčių bei kietųjų kūnų tamprumą, vienų kūnų įsiskverbimą į kitus (*difùziją*) galima paaiškinti remiantis šiais **molekulinės kinetinės teorijos teiginiais:**

1) bet kuris kūnas sudarytas iš dalelių – molekulių, atomų ar jonų;

2) kūną sudarančios dalelės nuolat ir chaotiškai juda;

3) tarp molekulių yra tarpai;

4) kūną sudarančios dalelės tarpusavyje sąveikauja – stumia ar traukia vienos kitą.

Molèkulė – tai mažiausia stabili medžiagos dalelė, pasižyminti pagrindinėmis tos medžiagos cheminėmis savybėmis. Ji susideda iš vieno ar daugelio atomų. **Mažiausia cheminio elemento dalelė – atòmas.** Jis yra nedalus ir sudarytas iš teigiamo branduolio bei apie jį skriejančių neigiamą krūvį turinčių elektronų. Ir atomas, ir molekulė yra elektriškai neutralūs – juos sudaro vienodas teigiamų ir neigiamų krūvių kiekis.

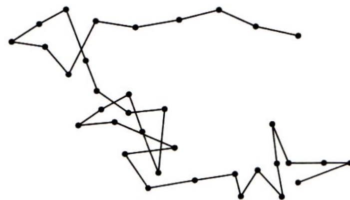
Pagrindinius molekulinės kinetinės teorijos teiginius patvirtina daugelis teorinių ir eksperimentinių išvadų. Būdingiausios ir dažniausiai pasireiškiančios yra šios:

1. Bet kurio kūno elementų masių santykis yra toks pats, kaip jo vienos molekulės.
2. Dujų mišinio slėgis lygus jį sudarančių atskirų dujų slėgių sumai (Daltono dėsnis).
3. Dujos užpildo visą joms skirtą erdvę.
4. Skysčiai ir dujos slegia ne tik indo dugną, bet ir sieneles.
5. Nuolat vyksta Brauno judėjimas.
6. Medžiagose vyksta difuzija.

Škotų botanikas Robertas Braunas (*Brown*) jaunystėje ketverius metus praleido ekspedicijose po Australiją, iš ten atsivežė keletą tūkstančių augalų pavyzdžių ir paskui visą gyvenimą juos tyrinėjo. 1827 m. vasarą, stebėdamas pro mikroskopą augalų dulkelių suspensiją vandens laše, Braunas atkreipė dėmesį, jog dulkelės visą laiką netvarkingai juda. Mokslininkas spėjo, kad kai kurioms organinėms medžiagoms yra būdinga „gyvoji jėga“, ir apie tų aktyvių molekulių egzistavimą parašė trumpą ataskaitą. Ji buvo atspausdinta, aišku, ne fizikos žurnale, ir fizikams tie rezultatai liko nežinomi. Tačiau Brauno darbas nepradingo be pėdsakų, nes atsirado jo pasekėjų, kurie nuosekliai išty-

rė pastebėtą reiškinį ir priėjo prie išvados, kad judėjimas, pavadintas jo atradėjo vardu, „vienodai gerai stebimas naktį kaime ir dieną netoli judrios gatvės, kur vaikščioja daug žmonių ir važinėja sunkūs ekipažai. Jis net nepriklauso nuo dulkelės rūšies, o tik nuo jų didumo ir, kas svarbiausia, niekada nesustoja“. Taip teko atsisakyti patrauklios Brauno hipotezės apie ypatingas organines molekules ir, praėjus keturiasdešimčiai metų po atradimo, priimti paprastesnę hipotezę, jog to amžinojo judėjimo priežastis – nuolatiniai skysčių molekulių susidūrimai su dulkelėmis.

Ši hipotezė pavirto teorija Einšteino dėka. 1905 m. jis paskelbė straipsnį, kuriame išdėstė savo samprotavimus apie tai, kaip chaotiškas molekulių judėjimas sukelia skystyje plaukiojančių dulkelių judėjimą. Vienu metu į dulkelę smogia daug molekulių, bet, kaip rodo tikimybių teorija, atsitiktiniai smūgiai į dulkelę iš įvairių pusių visai neatsveria vieni kitų. Lengvutei, skystyje pakibusiai dulkelei išjudinti pakanka ir mažytės atstojamosios jėgos, tad dulkelė ir blaškosi į įvairias puses, tų atsitiktinumų veikiama (75 pav.). Einšteinui pavyko teoriškai įrodyti, kaip Brauno judėjimas priklauso nuo molekulių dydžio, masės bei jų skaičiaus.



75 pav.

Po kelerių metų Žanas Perenas (*Perin*) atliko labai tikslius Brauno judėjimo stebėjimus ir, remdamasis Einšteino teorija, nustatė molekulių skaičių viename molyje $6{,}8 \cdot 10^{23}$ (tikslesnė šio skaičiaus, vadinamo Avogadro skaičiumi, vertė $6{,}02 \cdot 10^{23}$). Tai buvo pirmasis akivaizdus mažiausių medžiagos dalelių egzistavimo įrodymas. Netgi žymus atomų ir molekulių priešininkas filosofas Ostvaldas prisipažino klydęs ir priėmė, fizikų kalba tariant, „atominį tikėjimą“.

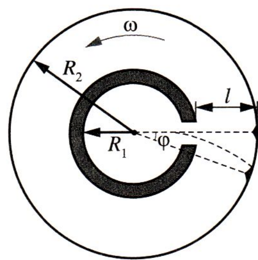
Kitas reiškinys, susijęs su molekulių judėjimu, yra *difuzija – vienos medžiagos molekulių prasiskverbimas į kitą*. Dėl difuzijos abiejų medžiagų dalelės susimaišo, medžiagos vėl tampa vienalytės. Kylant temperatūrai, difuzijos procesas vyksta greičiau, nes medžiagą sudarančios dalelės greičiau juda. Dujose difuzija vyksta labai greitai, o kietuose kūnuose – labai lėtai. Chemiškai grynose dujose difuzija pastebima dėl dujų tankio nevienodumo.

Difuzijos reiškinys įrodo ir tai, kad tarp molekulių yra tarpai. Ištirpus kai kurioms druskoms, tirpalo tūris nepadidėja, nes druskos molekulės pasiskirsto tarpuose tarp vandens molekulių. Šildomi kūnai plečiasi – tarpai tarp molekulių didėja, ir kūnai deformuojasi.

Pirmąjį bandymą molekulių greičiui išmatuoti 1920 m. atliko vokiečių fizikas Oto Šternas (*Stern*; 1888–1969), kuriam už šio metodo sukūrimą 1943 m. buvo paskirta Nobelio premija.

Bandymui mokslininkas panaudojo prietaisą, kurį sudaro du cilindrai, turintys bendrą sukimosi ašį. Išilgai ašies ištempta pasidabruota platininė viela. Oras iš erdvės tarp cilindrų buvo išsiurbtas. Kadangi bandymo metu elektros srovė, tekėdama viela, ją įšildydavo, tai sidabro atomai nuo vielos paviršiaus išgaruodavo. Vidiniame cilindre buvo padarytas plyšys. Sidabro atomai pralėkdavo pro jį ir nusėsdavo ant vidinės antrojo cilindro sienelės, sudarydami pastebimą sidabro juostelę.

Sukant cilindrus pastoviu kampiniu greičiu, susidariusi sidabro juostelė atsidurdavo vis kitoje vietoje. Žinant pasisukimo kampą φ tarp dviejų juostelės padėčių (76 pav.), atstumą l ($l = R_2 - R_1$) ir cilindrų sukimosi kampinį greitį ω, galima buvo nustatyti sidabro atomų greitį v: $v = \frac{l}{\Delta t} = \frac{l\omega}{\varphi}$.



76 pav.

Cilindrams sukantis susidariusi sidabro juostelė neturėjo tiksliai apibrėžtų kontūrų, nes iš vielos išgaravusių sidabro atomų greičiai buvo nevienodi. Šie greičiai sutapo su molekulinės kinetinės teorijos numatytomis vertėmis. Tai buvo vienas svarbiausių dujų molekulinės kinetinės teorijos teiginių praktinis patikrinimas ir pagrindimas, nes dar 1850 m. Džeimsas Maksvelas (*Maxwell*) matematiškai įrodė, kad molekulių chaotiško judėjimo greičiai dujose turi būti įvairūs, o O. Šternas, atlikęs eksperimentą, galutinai įrodė, jog sidabro molekulių greičiai iš tikrųjų yra nevienodi, o jų vertės pasiskirsto tam tikrame intervale.

Kaip jau žinome, dalelių sistemos (tarkime, dujų) fizikinius parametrus – temperatūrą, slėgį, energiją ir kt. – apsprendžia jų greitis. Pagal O. Šterno atliktą eksperimentą akivaizdu, kad ne visų dujų sistemos molekulių greitis yra vienodas. Todėl teko įvesti tokią greičio išraišką, kuri tiksliausiai atspindėtų nagrinėjamos sistemos molekulių greitį. Tarkime, jog turime uždarą indą, pripildytą dujų. Normaliomis sąlygomis jame esančios molekulės juda netvarkingai ir, nuolat susidurdamos viena su kita (tuo pačiu ir su indo sienelėmis), keičia ne tik greičio kryptį, bet ir didumą. Įsivaizduokime, kad pasirinkome molekulę, kurios greitį $\vec{v}$ išskaidome į tris dedamąsias v_x, v_y ir v_z (77 pav.). Greitis, artimas realiam, vadinamas greičio modulio kvadrato vidutine verte $\overline{v^2}$ ir apskaičiuojamas pagal formulę $\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \ldots + v_N^2}{N}$ arba $\bar{v} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \ldots + v_N^2}{N}}$; indeksai 1, 2, ..., N atitinka molekulių skaičių.

Pagal 77 paveikslą ir iš Pitagoro teoremos išplaukia, kad kiekvienos molekulės greičio modulio kvadratas yra lygus greičio projekcijų kvadratų sumai: $v_1^2 = v_{1x}^2 + v_{1y}^2 + v_{1z}^2$

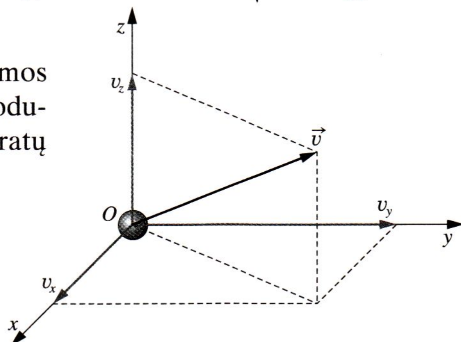
$v_2^2 = v_{2x}^2 + v_{2y}^2 + v_{2z}^2$

— — — — — — — — — — — — —

— — — — — — — — — — — — —

— — — — — — — — — — — — —

$v_N^2 = v_{Nx}^2 + v_{Ny}^2 + v_{Nz}^2$.

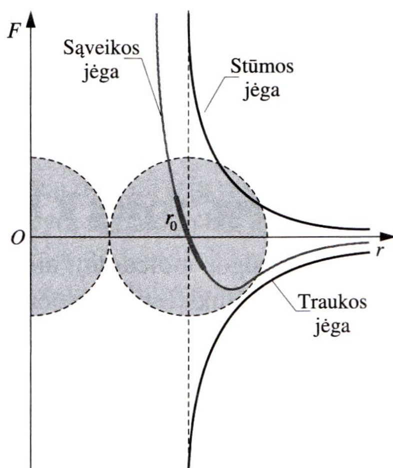


77 pav.

Sudėkime kairiąsias ir dešiniąsias lygčių puses ir abi gauto rezultato puses padalykime iš molekulių skaičiaus N. Matematiškai pertvarkę reiškinį, gausime išraišką, pagal kurią greičio modulio kvadrato vidutinė vertė lygi greičių projekcijų kvadratų sumai: $\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$. Kadangi molekulių greičio vektoriaus $\vec{v}$ projekcijos x, y, z ašyse yra lygiavertės $\left(\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}\right)$, tai greičio modulio kvadrato vidutinę vertę $\overline{v^2}$ galima

užrašyti taip: $\overline{v^2} = 3\,\overline{v_x^2}$. Iš šios lygties išplaukia, kad molekulių greičio projekcijos kvadrato vidutinė vertė lygi 1/3 greičio kvadrato vidutinės vertės:

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}. \tag{100}$$



78 pav.

Buvo pastebėta, kad bet kurios medžiagos molekulės stipriau ar silpniau sąveikauja tarpusavyje. Sąveikos jėgų pobūdis ir dydis priklauso nuo atstumo tarp molekulių (78 pav.). Kai molekulės artėja viena prie kitos, jų tarpusavio sąveikos atstojamoji (traukos jėga) ima didėti, pasiekia maksimumą ir vėl mažėja. Esant atstumui tarp molekulių $r = r_0$, atstojamoji jėga lygi nuliui. Tuomet traukos jėga atsveria stūmos jėgą, o atstumas r_0 atitinka dviejų molekulių stabilios pusiausvyros padėtį. Kai molekulės dėl kurios nors priežasties dar labiau suartėja, tarp jų vyrauja stūmos jėga (ji laikoma teigiama), besistengianti grąžinti molekules į pusiausvyros padėtį. Abi jėgos (traukos ir stūmos) veikia mažų atstumų ribose: atstumui didėjant, jos greitai silpnėja. Kai atstumai tarp molekulių didesni už 10^{-7} cm, tai jų tarpusavio sąveikos jėgų galima nepaisyti. Nuo tarpmolekulinių sąveikos jėgų didumo priklauso kietųjų kūnų tamprumas, mažas skysčių spūdumas ir daugelis kitų medžiagų savybių.

Šiuo metu pagrindinius molekulinės kinetinės teorijos teiginius galima patvirtinti daugybe bandymų su naujausia eksperimentine technika, pavyzdžiui, joniniu projektoriumi gaunami kristalų vaizdai atitinka anksčiau gautus tyrimo rezultatus, o elektroniniais mikroskopais gaunamų vaizdų dėka patikslinami atstumai tarp molekulių ir t. t.

Klausimai ir užduotys

1. Išvardykite pagrindinius molekulinės kinetinės dujų teorijos teiginius ir nurodykite pavyzdžius šiems teiginiams pagrįsti.

2. Paaiškinkite, kodėl, norint tvirtai sujungti du metalo gabalus, juos reikia įkaitinti žaizdro liepsnoje, sudėti vieną ant kito ir stipriai plakti kūju.

3. Sklidinoje vandens stiklinėje plūduriuoja gabalas ledo. Ar išsilies iš stiklinės vanduo ledui ištirpus?

4. Nesvarumo sąlygomis nebūna oro srovių konvekcijos – būtinos sąlygos degimui palaikyti. Tačiau ir tuomet žvakė arba degtukas kurį laiką dega silpna, blankia rutulio formos liepsna. Kodėl?

5. Paaiškinkite, kodėl Brauno judėjimas ir difuzija aukštesnėje temperatūroje vyksta intensyviau.

6. Užlašintas ant vandens paviršiaus 0,080 mg masės alyvų aliejaus lašas pasklinda 200 cm² apskrita aliejaus plėvele. Tarę, kad plėvelės storis yra tos pačios eilės, kaip aliejaus molekulės skersmuo, apskaičiuokite jį.

7. Šterno bandymui naudojamo prietaiso išorinis cilindras yra 240 mm skersmens. Įkaitinus vielą elektros srove ir pradėjus sukti cilindrą 3000 aps/min greičiu, sidabro juostelė pasislinko 9,8 mm. Koks buvo sidabro atomų greitis?

39. Dujų, skysčių ir kietųjų kūnų sandara

Medžiagos molekulių, atomų ir jonų šiluminis judėjimas yra chaotiškas, netvarkingas. Kuo aukštesnė temperatūra, tuo greičiau juda dalelės. Jų judėjimo greitis ir nulemia medžiagos agregatinę būseną, kurioje daugelio molekulių greičių vertės yra apytiksliai vienodos. Dalelių judėjimas dujose, skysčiuose ir kietuose kūnuose skiriasi dėl skirtingos jų molekulių sąveikos.

Dujų molekulės yra išsidėsčiusios toli viena nuo kitos. Dėl šios priežasties jų sąveikos jėgos yra mažos, ir molekulės išsidėsto po visą joms skirtą erdvę. Dujų molekulės susiduria tarpusavyje, smogia ir į indo sieneles. Skysčių ir dujų molekulės, atsitrenkdamos į indo sieneles, sukelia jame slėgį.

Skysčių molekulės yra arčiau viena kitos, jų sąveikos jėgos kur kas didesnės negu sąveikos jėgos tarp dujų molekulių. Dėl to jos svyruoja apie vieną pastovią padėtį (toji padėtis trunka neilgai), šuoliais pasislinkdamos atstumu, maždaug lygiu savo matmenims, į naujas padėtis. Tad, kaip matome, skystis sudarytas iš daugybės mikrosričių, kuriose molekulės išsidėsčiusios tam tikra – *artimąja – tvarka*. Toks skystis vadinamas *paprastúoju*. Tačiau kai kurie stambiamolekuliniai skysčiai pasižymi apibrėžtos skysčio srities molekulių orientacija kuria nors kryptimi. Panaudojus elektrinį arba magnetinį lauką, galima orientuoti visas molekules ir taip gauti skystąjį monokristalą. Šildomas jis virsta paprastuoju skysčiu.

Skystieji kristalai naudojami elektroniniuose laikrodžiuose ir skaičiuotuvuose skaičių bei raidžių indikacijai.

Artimoji tvarka būdinga ir *amòrfiniams kū́nams* (stiklui, vaškui, dervai, plastmasei). Tai – tarytum sustingę skysčiai.

Kristalinių kūnų molekulių sąveikos jėgos gana stiprios. Dėl to jų molekulės svyruoja apie tam tikras – pusiausvyros – padėtis, kurios kristale periodiškai pasikartoja. Kaip matome, kristalams būdinga *tolimoji tvarka*. Kristalą sudaro tam tikras elementariųjų narvelių skaičius. Todėl kietieji kūnai pakankamai ilgai išlaiko tūrį ir formą. Jiems būdingas tamprumas, o jų molekulių negalima suspausti.

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl suspausti skystį beveik taip pat sunku kaip ir kietąjį kūną?

2. Dujos gali neribotai plėstis. Kodėl egzistuoja Žemės atmosfera? Atsakymą pagrįskite.

40. Molekuliniai dydžiai

Ten, kur tobuliausi optikos ir elektronikos prietaisai nepajėgūs įžvelgti (10^{-10} m atstumus), klasikinė fizika pasibaigia ir prasideda mikropasaulis su tik jam būdingais reiškiniais ir įvairiapusiais dėsningumais.

Šiems reiškiniams apibūdinti taikomi kitokie fizikiniai dydžiai ir jų matavimo vienetai, nes įprastiniais vienetais matuoti molekulių mases yra nepatogu dėl jų mažumo, pvz., vandenilio molekulės masė yra $3{,}4 \cdot 10^{-27}$ kg, deguonies – $53{,}5 \cdot 10^{-27}$ kg, vandens – $3{,}1 \cdot 10^{-26}$ kg ir t. t. Tuo tikslu molekulinėje fizikoje yra įvestas naujas masės matavimo vienetas – **atòminės mãsės víenetas, kuris atitinka $\frac{1}{12}$ anglies atomo masės dalį:** $1u = 1{,}6 \cdot 10^{-27}$ kg.

Visų kitų elementų molekulių masės lyginamos su šiuo vienetu ir nurodoma, kiek kartų jos yra didesnės, nes mažesnės už u masės molekulių pasaulyje nėra. **Skaičius, rodantis, kiek kartų molekulės (atomo) masė yra didesnė už atominės masės vienetą, vadinamas santykinè molekulinè (atòmine) masè.** Ją žymime raide M_r. Pavyzdžiui, deguonies santykinė molekulinė masė lygi 32, anglies – 12, vandenilio – 2 ir t. t.

Paėmus 16 g deguonies, 12 g anglies arba 2 g vandenilio, t. y. paėmus bet kurios medžiagos tiek gramų, kokia yra jos santykinė molekulinė masė, joje bus vienodas molekulių skaičius, lygus $6{,}023 \cdot 10^{23}$. Šį dėsningumą XIX a. pradžioje atrado italų mokslininkas Amadeo Avogadras (*Avogadro*). Pastarasis atradimas moksle prilygsta žygdarbiui, todėl šis skaičius atradėjo garbei buvo pavadintas Avogadro skaičiumi. Jis žymimas N_A: $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ 1/mol.

Kadangi kiekviena medžiaga sudaryta iš dalelių (molekulių), todėl molekulinėje fizikoje, kaip ir chemijoje, naudojamas specialus fizikinis dydis – **mẽdžiagos kiẽkis (ν), kuris apibūdina dalelių skaičių kūne**. Medžiagos kiekio vienetas vadinamas *moliù* (mol). **Vienas mòlis lygus medžiagos kiekiui, kuriame yra tiek pat dalelių, kiek atomų turi 0,012 kg anglies** $\left({}^{12}_{6}C\right)$. Molis yra vienas iš pagrindinių SI vienetų sistemos matavimo vienetų: $[\nu]$ = mol.

Vieno molio masė tai medžiagos masė, esanti viename molyje. Ji žymima M:

$$M = \frac{m}{\nu}; \qquad (101)$$

čia m – medžiagos masė, ν – medžiagos kiekis.

Medžiagos molekulių skaičiaus N ir medžiagos kiekio ν santykis vadinamas *Avogãdro skaĩčiumi* N_A:

$$N_A = \frac{N}{\nu}. \qquad (102)$$

Avogadro skaičius $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$ **parodo, kiek atomų arba molekulių yra viename molyje medžiagos.**

Medžiagos kiekį ν galima išreikšti medžiagos atomų arba molekulių skaičiaus N ir Avogadro skaičiaus N_A santykiu:

$$\nu = \frac{N}{N_A}. \qquad (103)$$

Avogadras atrado, kad **tomis pačiomis sąlygomis bet kurių dujų vienas molis užima vienodą tūrį**. Normaliomis sąlygomis (kai slėgis lygus 101,3 kPa, o temperatūra 0 ^{0}C) jis lygus 0,0224 m^3. Taigi vienodas skaičius bet kurių dujų molekulių užima vienodą tūrį.

Iš to išplaukia, kad vienetiniame bet kurių dujų tūryje turi būti vienodas molekulių skaičius:

$$N_L = \frac{N_A}{V_{mol}} = \frac{6{,}023 \cdot 10^{23}\,\mathrm{mol}^{-1}}{0{,}0224\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{mol}}} = 2{,}7 \cdot 10^{25}\,\frac{1}{\mathrm{m}^3}. \quad (104)$$

Molekulių skaičius, esantis dujų tūrio vienete normaliomis sąlygomis, vadinamas Lòšmidto skaĩčiumi ir žymimas N_L.

Apskaičiuojant molekulės masę m_0, reikia medžiagos masę padalyti iš molekulių skaičiaus N: $m_0 = \frac{m}{N}$. Be to, medžiagos molekulės masę galima rasti žinant molio masę ir Avogadro skaičių.

Medžiagos molio masė dažniausiai nustatoma cheminiais metodais, o Avogadro skaičius yra apskaičiuotas ir patikslinamas įvairiais fizikiniais metodais.

Atomų ir molekulių masės nustatomos *mãsės spektrometrù* – prietaisu, kuris elektrinių ir magnetinių laukų veikiamus elektringųjų dalelių (jonų) pluoštus paskirsto erdvėje pagal jų masę ir krūvį.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname šiluminiu judėjimu? šiluminiais reiškiniais?

2. Iš stiklinės per 20 parų išgaravo 0,2 kg vandens. Kiek molekulių kas sekundę išlėkdavo iš vandens paviršiaus?

3. Nustatykite aliejaus molekulės dydį, jei 1 mm^3 aliejaus lašas vandens paviršiuje pasklinda 0,6 m^2 plote.

4. Deguonies molekulės skersmuo lygus 2,98 · 10^{-10} m. Kokio ilgio grandinėlę gautume, jeigu išdėstytume į vieną eilę molekules, esančias 0,5 cm^3 normaliomis sąlygomis?

5. Apskaičiuokite deguonies, angliarūgšties dujų, vandens garų ir amoniako molekulių mases.

6. Kiek molekulių yra 10 g deguonies?

7. Palyginkite atomų, kurie sudaro vienodo tūrio sidabrinį ir aliumininį šaukštelį, skaičių.

8. Kam lygi 50 molių anglies dvideginio masė?

41. Molekulinės kinetinės idealiųjų dujų teorijos pagrindinė lygtis

Dujinės medžiagos savybėms paaiškinti taikomas *idealiũjų dùjų* modelis. Tokių dujų būdingos savybės yra šios:

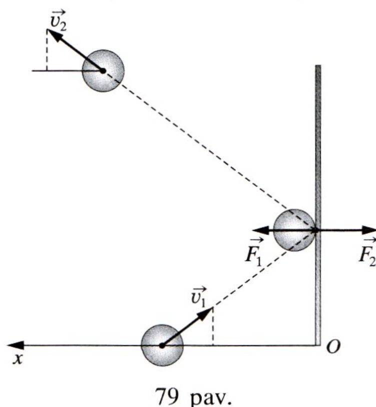
1) jų molekulės mažos, palyginus su atstumais tarp jų; 2) molekulių tūris labai mažas, palyginus su indo tūriu; 3) molekulės tarpusavyje nesąveikauja, nes neveikia traukos jėgos; todėl dujų molekulės laisvai (chaotiškai) juda, tolygiai užpildydamos visą uždarą tūrį, o neuždarytos – neribotai plečiasi; 4) molekulės susiduria su kitomis molekulėmis arba su indo sienelėmis ir juda kaip absoliučiai tamprūs rutuliukai.

Atstumas, kurį dujų molekulė nuskrieja tarp dviejų susidūrimų, vadinamas laisvúoju keliù. Normaliomis sąlygomis ($p = 1{,}013 \cdot 10^5$ Pa; $t = 0$ °C) šis kelias yra šimtus kartų ilgesnis už molekulės matmenis. Todėl molekulės laisvas judėjimas tolygiai ir tiesiai trunka kur kas ilgiau negu sąveika su kita molekule. Mums, įpratusiems prie makroskopinio pasaulio, milijardas susidūrimų per sekundę atrodo nenutrūkstamas sąlytis, o mikroskopinio molekulių pasaulio mastais tai atitinka trumputes „bendravimo" valandėles kartą per mėnesį...

Dujų molekulių laisvąjį kelią, t. y. nuotolį nuo vieno susidūrimo iki kito, reikia skirti nuo vidutinio atstumo tarp molekulių, kuris kambario sąlygomis yra tik apie dešimt kartų didesnis už molekulių matmenis.

Vienas pirmųjų svarbių molekulinės kinetinės teorijos laimėjimų – kokybinis ir kiekybinis dujų slėgio į indo sieneles paaiškinimas.

Kokybiškai dujų slėgį aiškiname tuo, kad idealiųjų dujų molekulės, atsitrenkdamos į indo sieneles, sąveikauja su jomis pagal mechanikos dėsnius kaip tamprieji kūnai. Kai molekulė susiduria su indo sienele, jos greičio vektoriaus projekcijos v_x ašyje Ox, statmenoje sienelei, ženklas pasikeičia priešingu, o modulis išlieka pastovus (79 pav.). Todėl šios molekulės judesio kiekio vektoriaus projekcija Ox ašyje pakinta nuo $mv_{1x} = -mv_x$ iki $mv_{2x} = mv_x$.



79 pav.

Kadangi pakinta molekulės judesio kiekis, vadinasi, atsitrenkusią į indo sienelę molekulę veikia jėga $\vec{F}_1$, nukreipta nuo sienelės. Molekulės judesio kiekio pokytis Δp lygus jėgos $\vec{F}_1$ impulsui: $F_1 t = mv_{2x} - mv_{1x} = mv_x - (-mv_x) = 2\,mv_x$.

Susidūrimo metu molekulė veikia sienelę jėga $\vec{F}_2$, kuri pagal trečiąjį Niutono dėsnį lygi jėgai $\vec{F}_1$, bet yra priešingos jai krypties.

Dujose molekulių yra be galo daug, todėl jos smūgiuoja sienelę labai dažnai. Kiekviena iš šių molekulių atsitrenkimo į sienelę metu veikia ją tam tikra jėga. Tų jėgų vektorinės sumos vidutinė vertė vadinama *slėgìmo jėgà*, kuria dujos veikia indo sieneles. Dujų slėgis lygus slėgimo jėgos $\vec{F}$ modulio ir sienelės ploto S santykiui: $p = \frac{F}{S}$.

Remiantis šiais samprotavimais ir pagrindiniais molekulinės kinetinės teorijos teiginiais, gauname lygtį, pagal kurią apskaičiuojame slėgį dujose, kai žinoma dujų molekulės masė m_0, jų greičio kvadrato vidurkis $\overline{v^2}$ ir molekulių koncentracija n:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}. \qquad (105)$$

1738 m. šveicarų mokslininkas Danielis Bernulis pirmasis nustatė šį ryšį, taikydamas molekulinę kinetinę teoriją. Ji vadinama molekulinės kinetinės dujų teorijos pagrindine lygtimi ir svarbi tuo, kad sieja slėgį, kaip makroskopinį dydį, kurį galima išmatuoti manometru, su mikroskopiniais molekulių parametrais.

Idealiųjų dujų molekulės slenkamojo judėjimo vidutinę kinetinę energiją pažymėję $\bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$, gauname kitą (105) lygties variantą:

$$p = \frac{2}{3} n\bar{E}. \qquad (106)$$

Remiantis pastarąja lygtimi, galima daryti išvadą, kad **idealiųjų dujų slėgis lygus dviem trečiosioms tūrio vienete esančių molekulių slenkamojo judėjimo vidutinės kinetinės energijos.**

5 lentelė

Svarbiausios molekulinės kinetinės teorijos sąvokos

Fizikinio dydžio formulės pavadinimas	Žymėjimas	Paaiškinimai	Apskaičiavimo formulės
Molekulės masė	m_0	Pvz., $m_0(H_2O) = 3 \cdot 10^{-26}$ kg	$m_0 = \frac{m}{N}$; $m_0 = \frac{M}{N_A}$
Atomo masė	m_a	Pvz., $m_a(C) = 2{,}0 \cdot 10^{-26}$ kg	$m_0 = M_r \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg
Atominės masės vienetas	u	Lygus $\frac{1}{12}$ anglies atomo masės $1u = \frac{1}{12} m_a(C)$	$1\ u = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg
Santykinė atominė masė	A_r	Parodo, kiek kartų elemento atomo masė yra didesnė už atominės masės vienetą.	$A_r = \frac{m_a}{\frac{1}{12} m_a(C)}$
Santykinė molekulinė masė	M_r	Parodo, kiek kartų molekulės masė yra didesnė už atominės masės vienetą.	$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_a(C)}$
Molekulių koncentracija	n	Molekulių skaičius, esantis 1 m^3. Jų koncentraciją galima apskaičiuoti, jeigu žinomas bendras molekulių skaičius N ir kūno tūris V.	$n = \frac{N}{V}$
Medžiagos kiekis	ν	Fizikinis dydis, apibūdinantis dalelių skaičių kūne. Kūno molekulių skaičiaus N ir atomų, esančių 0,012 kg anglies (N_A), santykis.	$\nu = \frac{N}{N_A}$; $\nu = \frac{m}{M}$; $\nu = \frac{V}{V_M}$
Avogadro skaičius	N_A	Atomų skaičius, esantis 0,012 kg anglies.	$N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ mol^{-1}

Tęsinys

Fizikinio dydžio formulės pavadinimas	Žymėjimas	Paaiškinimai	Apskaičiavimo formulės
Molis	mol	Medžiagos kiekio vienetas. Medžiagos kiekis, kuriame yra $6{,}023 \cdot 10^{23}$ dalelių.	$[\nu] = \mathrm{mol}$
Molio masė	M	Medžiagos masė, esanti viename molyje.	$M = m_0 N_A$; $M = M_r \cdot 10^{-3}$ kg/mol
Molio tūris	V_M	Tūris kūno, kurio medžiagos kiekis lygus 1 moliui. Visų dujų vieno molio tūris normaliomis sąlygomis yra vienodas.	$V_M = \frac{V}{\nu}$; $V_M = 22{,}4$ l/mol
Molekulių greičio modulio vidutinė vertė	$\bar{v}$	Pvz., jeigu $v_1 = 300$ m/s; $v_2 = 400$ m/s, tai $\bar{v} = 350$ m/s.	$v = \frac{v_1 + v_2 + \ldots + v_N \ldots}{N}$
Greičio modulio kvadrato vidutinė vertė	$\overline{v^2}$	Jeigu $v_1 = 300$ m/s, $v_2 = 400$ m/s, šių molekulių greičio kvadrato vidurkis $\overline{v^2} = 12{,}5 \cdot 10^4 \frac{m^2}{s^2}$.	$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \ldots + v_N^2 \ldots}{N}$
Molekulių greičio projekcijos kvadrato vidutinė vertė	$\overline{v_x^2}$		$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$
Molekulės slenkamojo judėjimo vidutinė kinetinė energija	$\bar{E}$	Kinetinė energija priklauso nuo judančios molekulės masės ir greičio.	$\bar{E} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$
Idealiųjų dujų slėgis	p	Parodo, kokia jėga veikia paviršiaus ploto vienetą.	$p = \frac{F}{S}$; $p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}$; $p = \frac{2}{3} n\bar{E}$; $p = nkT$
Medžiagos tankis	ρ	Parodo, kokia yra medžiagos tūrio vieneto masė.	$\rho = \frac{m}{V}$; $\rho = m_0 n$

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl, matuojant molekulių greitį, iš Šterno įrenginio išsiurbiamas oras?

2. Kodėl, būdamos greitesnės už kulką, dujų molekulės neperšauna vaikiško balionėlio?

3. Normaliomis sąlygomis vidutinis azoto molekulių greitis lygus 450 m/s. Apskaičiuokite vidutinį šių molekulių laisvąjį kelią, jei žinoma, kad kiekviena šių molekulių kas sekundę vidutiniškai susiduria $7{,}5 \cdot 10^9$ kartų.

4. Kambaryje buvo iškūrenta krosnis. Kodėl nepadidėjo vidinė oro energija, nors jo temperatūra ir pakito?

5. 2,6 kg azoto tūris 3,4 m^3, o slėgis $1{,}2 \cdot 10^5$ Pa. Apskaičiuokite azoto molekulių vidutinį kvadratinį greitį, vidutinę slenkamojo judėjimo energiją, taip pat visų molekulių energiją.

6. 1,4 l tūrio inde yra $4 \cdot 10^{22}$ helio atomų. Dujų slėgis kolboje lygus 10^6 Pa. Apskaičiuokite helio atomų vidutinę kinetinę energiją.

7. Dujų molekulių greičio kvadrato vidurkis $\overline{v^2} = 10^6 \frac{m^2}{s^2}$, molekulių koncentracija $3 \cdot 10^{25}$ m^{-3}, tūris 10 m^3, molekulės masė $5 \cdot 10^{-26}$ kg. Apskaičiuokite dujų slėgį, tankį, molekulių slenkamojo judėjimo vidutinę kinetinę energiją. Koks yra bendras molekulių skaičius nurodytame tūryje? Apskaičiuokite dujų masę bei molio masę. Kokį tūrį užima šių dujų molekulės?

8. Užpildykite 6-tą lentelę.

6 lentelė

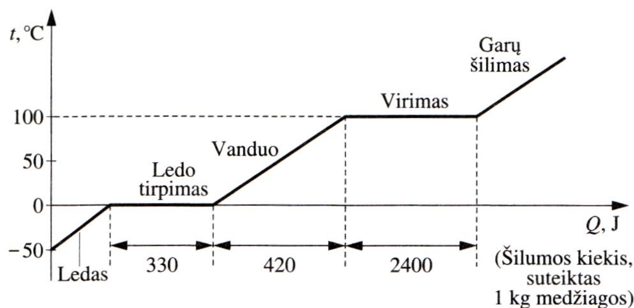
Pagrindinės medžiagų charakteristikos

Fizikinio dydžio pavadinimas	Medžiaga			
	Varis (Cu)	Anglies dioksidas (CO_2)	Deguonis (O_2)	Vandenilis (H_2)
1. Santykinė molekulinė masė (M_r)				
2. Molio masė (M)				
3. Molekulės masė (m_0)				
4. Medžiagos tankis normaliomis sąlygomis (ρ)				
5. Molekulių koncentracija (n)				

42. Temperatūra – molekulių vidutinės kinetinės energijos matas

Remiantis molekuline kinetine teorija, iš 106 lygties nesunku suvokti ryšį tarp išmatuojamo makroskopinio parametro – slėgio ir mikroskopinių fizikinių dydžių (molekulių vidutinės kinetinės energijos, koncentracijos), apibūdinančių dujų sistemos savybes.

Vien tik išmatavę dujų slėgį, negalime apibūdinti nei molekulių vidutinės kinetinės energijos, nei jų koncentracijos. Tam, kad rastume ir kitus mikroskopinius dujų parametrus, reikia išmatuoti dar vieną fizikinį dydį, susietą su molekulių vidutine kinetine energija – nagrinėjamos sistemos dujų temperatūrą.



80 pav.

Žinome, kad kūnai būna karšti ir šalti. Sulietus du kūnus, kurių vienas karštas, o kitas šaltas, kinta tiek pirmojo, tiek ir antrojo kūno **makroskòpiniai parãmetrai (tūris** ***V*****, slėgis** ***p*** **ir temperatūra** ***T*****), t. y. fizikiniai dydžiai, kurie apibūdina ne atskiras molekules, bet visas kūno molekules.** Pavyzdžiui, kietieji kūnai ir skysčiai šildomi plečiasi; ledo gabalas, įmestas į indą su šiltu vandeniu, ištirpsta, ir po kurio laiko inde esančio vandens makroskopiniai parametrai nustoja kisti. **Būsena, kuriai esant makroskopiniai parametrai ilgai lieka pastovūs, vadinama šiluminė pusiáusvyra. Fizikinis dydis, kuris apibūdina makroskopinės sistemos šiluminės pusiausvyros būseną, vadinamas temperatūrà. Visų sistemos, esančios šiluminėje pusiausvyroje, dalių temperatūra yra vienoda.** Jeigu, sulietus du kūnus, nė vieno jų makroskopinis parametras, pavyzdžiui, tūris ar slėgis, nekinta, tai kūnai vienas kitam šilumos neperduoda ir jų temperatūra yra vienoda. Ji matuojama *termometrù*.

Dažnai šilumos ir temperatūros sąvokos painiojamos ir net tapatinamos, nors tai yra du skirtingi dydžiai; jie net nėra tiesiogiai proporcingi vienas kitam (80 pav.).

Temperatūra nurodo kūno būseną (jo dalelių chaotiško judėjimo energiją), o šiluma – vieno kūno kitam perduodamą vidinę energiją. Ryšys tarp jų tik toks, kad **šiluma sklinda iš kūno, turinčio aukštesnę temperatūrą, į kūną, kurio temperatūra yra žemesnė**, – tai pagrindinė šilumos savybė. Iš savo gyvenimiškos patirties žinome, jog kūnas vėsta tuo greičiau, kuo didesnis jo ir aplinkos temperatūrų skirtumas ΔT (šį teiginį pirmasis suformulavo Niutonas, pagal kurį vėsimo sparta yra proporcinga temperatūros skirtumui).

Kasdienėje praktikoje temperatūra dažniausiai matuojama skysčio termometru. Jį konstruojant, taikoma kaitinamų skysčių, dažniausiai – gyvsidabrio, alkoholio ir glicerino – plėtimosi savybė. Norint išmatuoti kūno temperatūrą, reikia termometrą suliesti su tuo kūnu. Kūnas perduos šilumą termometrui tol, kol nusistovės šiluminė pusiausvyra. Kad parodymai būtų kiek galima tikslesni, termometro masė turi būti daug mažesnė už kūno masę.

Skysčio tūris termometre nustoja kisti, kai tarp kūno ir termometro nebevyksta šilumos mainai. Tada termometro skysčio temperatūra yra lygi kūno temperatūrai.

Termometrą pradžioje įdėkime į tirpstantį ledą, po to – į normalaus slėgio verdantį vandenį. Kiekvieną kartą pažymėkime termometro vamzdelyje esančio skysčio stulpelio galo padėtį. Atkarpą tarp šių atžymų padalykime į 100 lygių dalių. Taip gausime Celsijaus temperatūros skalę. Tirpstančio ledo temperatūra lygi 0 °C, o verdančio van-

dens – 100 °C. Termometre esančio skysčio stulpelio ilgio pokytis viena šimtąja dalimi tarp 0 °C ir 100 °C atžymų atitinka temperatūros pokytį, lygų 1 °C.

Norint tiksliau matuoti temperatūrą, reikia rasti tokį dydį, kuris kiekvieno šiluminės pusiausvyros būsenos kūno atžvilgiu būtų vienodas.

Iš bandymų nustatyta, kad *dujų, esančių šiluminėje pusiausvyroje, slėgio bei tūrio sandaugos ir molekulių skaičiaus santykis yra pastovus bet kuriai dujų rūšiai* ir išreiškiamas džauliais: $\frac{p_1V_1}{N_1}=\frac{p_2V_2}{N_2}=\frac{p_3V_3}{N_3}=\theta$. Pavyzdžiui, 0 °C temperatūroje šis santykis lygus $3{,}76\cdot10^{-21}$ J, o 100 °C temperatūroje – $5{,}14\cdot10^{-21}$ J. Kadangi šiluminės pusiausvyros būseną apibūdina temperatūra, todėl logiška manyti, kad

$$\frac{pV}{N}=kT; \qquad (107)$$

čia T – temperatūra, k – proporcingumo koeficientas. Ši lygtis rodo, jog galima pasirinkti temperatūros skalę, nepriklausančią nuo dujų rūšies.

Analizuodami (107) formulę, galime daryti tokias išvadas:

1. Jeigu dujų slėgis lygus nuliui arba tūris artėja prie labai mažo dydžio (artimo nuliui), tai temperatūra lygi nuliui (T = 0) ir vadinama *absoliučiõsios temperatū̃ros nuliù*.

2. Absoliučiosios temperatūros skalės matavimo vienetas vadinamas *kèlvinu*: $[T]$ = K.

Absoliučiąją temperatūros skalę pasiūlė anglų fizikas V. Tomsonas (Kelvinas), gyvenęs 1825–1907 m., todėl ji dar vadinama Kelvino skale. Kol ji nebuvo naudojama, praktikoje buvo taikoma Celsijaus temperatūros matavimo skalė. Todėl absoliučiosios temperatūros skalės matavimo vienetas kelvinas (K) lygus vienam Celsijaus skalės laipsniui: 1 K = 1 °C.

3. Iš (107) formulės aiškėja ir tai, kad proporcingumo koeficientas k (Bolcmano konstanta) sieja džauliais išreikštą santykį $\frac{pV}{N}$ su temperatūra T, išreikšta kelvinais. Austrų fiziko Liudviko **Bòlcmano** (*Boltzmann*; 1844–1906) vardu pavadinta **konstanta *k* parodo, kiek vidutiniškai pasikeičia kiekvienos molekulės kinetinė energija, dujų temperatūrai pakitus vienu kelvinu.**

Jeigu, šildant dujas nuo 0 °C iki 100 °C, santykis $\frac{pV}{N}$ padidėja dydžiu (5,14 – – 3,76)10^{-21} J, tai, dalydami jį iš 100 °C arba iš 100 K, nustatysime, kiek pasikeičia dydis $\frac{pV}{N}$ šildant tas dujas 1 K. Taip samprotaudami, gauname skaitinę koeficiento k vertę:

$$k=\frac{5{,}14\cdot10^{-21}\,\mathrm{J}-3{,}76\cdot10^{-21}\,\mathrm{J}}{100\,\mathrm{K}}=1{,}38\cdot10^{-23}\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}.$$

4. 0 °C temperatūroje sandauga kT_0 = $3{,}76\cdot10^{-21}$ J. Iš to išplaukia, kad $T_0=\frac{3{,}76\cdot10^{-21}\,\mathrm{J}}{1{,}38\cdot10^{-23}\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}}=273$ K. Vadinasi, absoliučiosios temperatūros vertė T yra 273 laipsniais didesnė už atitinkamą temperatūrą t pagal Celsijaus skalę:

$$T=t+273. \qquad (108)$$

5. Iš pagrindinės dujų molekulės kinetinės teorijos lygties nustatome molekulių slenkamojo judėjimo vidutinės kinetinės energijos ir temperatūros ryšį: $p=\frac{2N}{3V}\frac{m\overline{v^2}}{2}$ arba $\frac{pV}{N}=\frac{2}{3}\bar{E}$. Kita vertus, $\frac{pV}{N}=kT$, todėl $\frac{2}{3}\bar{E}=kT$, o

$$\bar{E}=\frac{3}{2}kT. \qquad (109)$$

Galima daryti išvadą, kad **netvarkingai judančių molekulių vidutinė slenkamojo judėjimo kinetinė energija tiesiogiai proporcinga absoliučiajai temperatūrai.** Kita vertus, galima teigti, kad **temperatūra yra kūno molekulių vidutinės kinetinės energijos matas.**

6. Iš 109 lygties nustatysime dujų molekulių vidutinio kvadratinio greičio matematinę priklausomybę nuo jų temperatūros. Žinome, kad molekulės vidutinė kinetinė energija $\bar{E}=\frac{m_0\bar{v}^2}{2}$, todėl galime parašyti: $\frac{m_0\bar{v}^2}{2}=\frac{3}{2}kT$. Iš čia išplaukia, jog dujų molekulių vidutinį kvadratinį greitį galima apskaičiuoti pagal formulę

$$\bar{v}=\sqrt{\frac{3kT}{m_0}}; \qquad (110)$$

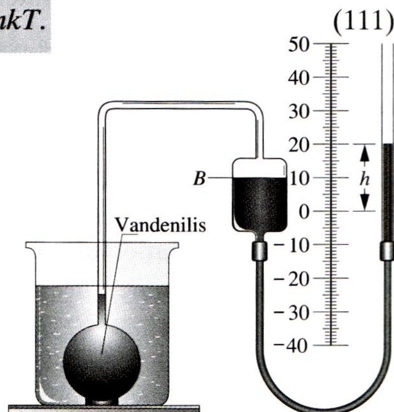
čia m_0 – vienos molekulės masė, k – Bolcmano konstanta, T – temperatūra.

7. Analizuojant 109 ir 110 formules, daroma išvada, kad, pasiekus temperatūrą $T = 0$, molekulių kinetinė energija, taigi ir jų chaotiško judėjimo greitis lygūs nuliui. Atrodytų, kad absoliučiojo nulio temperatūroje išnyksta bet koks molekulių judėjimas. Teorija ir bandymai patvirtina, kad taip nėra. Žemų temperatūrų sąlygomis pradeda veikti kitokie (kvantiniai) dalelių judėjimo dėsniai, todėl gautų išvadų negalima taikyti. Tad ir absoliučiojo nulio temperatūroje sistema gali turėti nelygią nuliui judėjimo energiją. **Absoliučiojo nulio temperatūroje išnyksta tik šiluminis molekulių judėjimas.**

Iš formulės $\frac{pV}{N}=kT$ nustatome, kad

$$p=\frac{N}{V}kT, \text{ arba } p=nkT. \qquad (111)$$

Gavome, kad dujų slėgis yra tiesiog proporcingas molekulių skaičiui tūrio vienete ir absoliučiajai dujų sistemos temperatūrai. Pritaikius dujų slėgio priklausomybės nuo temperatūros sąryšį, techniškai sudėtingas temperatūros matavimas pakeičiamas daug paprastesniu dujų slėgio matavimu. Tokiems matavimams atlikti yra naudojamas dujinis termometras (81 pav.). Visi praktikoje naudojami dujiniai termometrai yra graduojami, lyginami ir tikrinami su vandenilio termometrų parodymais.



81 pav.

9. Iš formulės $p = nkT$ išplaukia, kad **vienodo slėgio ir temperatūros dujų molekulių koncentracija yra vienoda ir nepriklauso nuo jų rūšies** $\left(\text{nes } n = \dfrac{p}{kT}\right)$.

10. Iš formulės $\dfrac{pV}{N} = kT$ išplaukia, kad **bendras dujų molekulių skaičius tam tikrame tūryje priklauso tik nuo dujų slėgio ir temperatūros**:

$$N = \frac{pV}{kT}. \tag{112}$$

Tai ir yra Avogadro dėsnio formulė.

Klausimai ir užduotys

1. Įrašykite ieškomuosius dydžius:

Temperatūra pagal Celsijaus skalę (t °C)	**0 °C**	**27 °C**	**–23 °C**		
Absoliučioji temperatūra (T, K)				**373 K**	**573 K**

2. 27 °C temperatūroje dujų molekulės vidutinis kvadratinis greitis lygus 500 m/s. Raskite molekulės masę. Kokia yra šių dujų koncentracija, jeigu slėgis normalus? Koks šių dujų tankis? Kokia tokių dujų masė, jeigu jos užima 10 m^3 tūrį? Kokia dujų molio masė?

3. Apskaičiuokite angliarūgštės dujų molekulių vidutinį kvadratinį greitį ir vidutinę kinetinę energiją 223 K temperatūroje.

4. Kiek kartų pakis vienatomių dujų slėgis, kai jų tūris sumažės perpus? Yra žinoma, kad molekulių vidutinis greitis nepakinta.

5. Kiek kartų pakis vienatomių dujų slėgis, kai jų tūris sumažės perpus, o molekulių vidutinė kinetinė energija padidės 3 kartus?

6. Ką molekulinės kinetinės teorijos požiūriu apibūdina absoliučioji temperatūra? Parašykite, kaip ji susijusi su Celsijaus temperatūra.

7. Kosminės medžiagos tankis lygus nuliui. Kokią temperatūrą rodys termometras atviroje kosminėje erdvėje? Atsakymą pagrįskite.

8. Orą daugiausia sudaro azoto ir deguonies molekulės. Ar vienoda šių dujų molekulių slenkamojo judėjimo kinetinė energija tam tikroje temperatūroje? Kodėl?

9. Vienatomių dujų temperatūra 300 K, o slėgis 0,6 MPa. Apskaičiuokite šių dujų molekulių vidutinę kinetinę energiją ir koncentraciją.

10. Kokios temperatūros vienatomių dujų molekulių vidutinė kinetinė energija bus 3 kartus didesnė negu –53 °C temperatūros dujų?

11. Tam tikrų dujų molekulių vidutinis kvadratinis greitis normaliomis sąlygomis lygus 460 m/s. Kiek molekulių yra 1,2 g šių dujų?

43. Idealiųjų dujų būsenos lygtis

Praktikoje dažnai susiduriame su tokiais šiluminiais reiškiniais, kai vienu metu kinta net trys termodinaminiai dujų parametrai: tūris, slėgis ir temperatūra. Pavyzdžiui, vidaus degimo variklyje, užsidegus dujoms, kyla jų temperatūra, dujos plečiasi, didėja slėgis. Kylant oro balionui, atmosferos slėgis mažėja, temperatūra krinta, balionas pučiasi. Tokius procesus reikia mokėti ne vien apskaičiuoti, bet ir sugebėti juos įvaldyti. Šią problemą 1834 m. išsprendė prancūzų fizikas Benua Klapeironas (*Clapeyron*; 1799–1864).

Remiantis idealiųjų dujų slėgio priklausomybe nuo jų temperatūros ir molekulių koncentracijos $p = nkT$, galima susieti pagrindinius makroskopinius dujų parametrus: tūrį V, slėgį p ir temperatūrą T.

Dujų molekulių koncentraciją užrašykime jau žinoma lygtimi $n = \frac{N}{V} kT$ (čia N – dujų molekulių skaičius inde, kurio tūris V), o molekulių skaičių N galime išreikšti medžiagos kiekio ν ir Avogadro skaičiaus N_A sandauga: $N = \nu N_A$. Matematiškai pertvarkę šias lygtis, gauname $p = \frac{\nu N_A}{V} kT$. Avogadro skaičiaus N_A ir Bolcmano konstantos k sandauga yra vadinama *universaliąja dùjų konstánta* R: $R = N_A k$. Jos skaitinė vertė $R = 6{,}022 \cdot 10^{23}\,\text{mol}^{-1} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23}\,\text{J/K} \approx 8{,}31\,\text{J/mol K}$.

Universaliosios dujų konstantos skaitinė vertė yra lygi darbui, kurį atlieka 1 mol dujų, izobariškai besiplėsdamas, kai temperatūra pakeliama 1 K (žr. §44).

Įvedus universalios konstantos sąvoką, pastaroji lygtis įgauna tokį pavidalą:

$$pV = \nu RT. \tag{113}$$

Medžiagos kiekį ν išreiškiame medžiagos masės m ir jos molio masės M santykiu: $\nu = \frac{m}{M}$. Šią išraišką įrašę į 113 lygtį, gauname:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \tag{114}$$

Ši lygtis vadinama *idealiųjų dujų būsenos lygtimi*. Pirmasis ją išvedė Klapeironas, o pritaikė rusų mokslininkas Dmitrijus Mendelejevas (1834–1907), todėl dujų būsenos lygtis vadinama Klapeirono ir Mendelejevo lygtimi.

Idealiųjų dujų sistema gali pereiti iš vienos būsenos į kitą kintant visiems būsenos parametrams. Iš 113 lygties išreikškime narį νR: $\nu R = \frac{pV}{T}$.

Tarkime, kad pradinę dujų būseną nusako parametrai V_1, p_1, T_1. Įvykus tam tikriems procesams, visi trys dujų sistemos parametrai pakito ir jų vertės tapo lygios V_2, p_2 ir T_2, pastovi liko tik šių dujų masė. Remiantis šia logika, galima daryti prielaidą, kad:

1 būsena: $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \nu R$

2 būsena: $\frac{p_2 V_2}{T_2} = \nu R$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = const. \tag{115}$$

Tai idealiųjų dujų būsenos lygtis, kitaip dar vadinama jos atradėjo Klapeirono lygtimi. Iš jos išplaukia, **kad dujų tūrio ir slėgio sandauga, padalyta iš absoliučiosios temperatūros (kai dujų masė nekinta), yra pastovus dydis bet kuriai dujų rūšiai.**

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl giliavandenė žuvis, iškelta į paviršių, išsipučia?

2. Kodėl kriptono dujų, kuriomis pripildomos elektros lempos, slėgis turi būti žemas?

3. Raskite 300 m^3 tūrio oro masę, kai temperatūra lygi 27 °C ir atmosferos slėgis normalus. Oro molio masė 0,029 kg/mol. Apskaičiuokite oro tankį bei molekulių skaičių duotame tūryje. Raskite šių dujų molekulių koncentraciją ir jų masę.

4. Kokį slėgį sudaro deguonies dujos, 103 °C temperatūroje užimančios 40 l tūrį, jeigu normaliomis sąlygomis jos užima 13,65 l? Apskaičiuokite jų masę.

5. Kai slėgis lygus $7{,}2 \cdot 10^5$ Pa, o temperatūra 288 K, dujos užima 0,60 m^3 tūrį. Kokiai temperatūrai esant tos dujos užims 1,6 m^3 tūrį, sudarydamos $2{,}25 \cdot 10^5$ Pa slėgį?

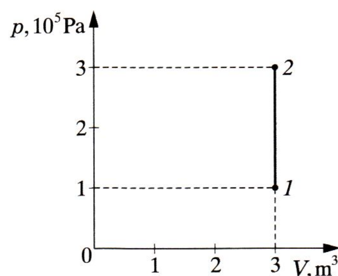
6. Ežere, 100 m gylyje, esant 8 °C temperatūrai, laikosi pusiausviras plonasienis guminis balionas, pripūstas oro. Kokia balione esančio oro masė, jeigu visa baliono masė lygi 40 g, o atmosferos slėgis 99,7 kPa?

7. Oro balionas pripildytas helio, kurio temperatūra 27 °C ir slėgis 10^5 Pa. Baliono tūris lygus 500 m^3. Koks bus į viršutinius atmosferos sluoksnius pakilusio šio baliono tūris, kai temperatūra sumažės iki – 33 °C, o slėgis bus lygus $5 \cdot 10^4$ Pa? Helio masę laikykite pastovia.

8. Kaip pasikeis iš 20 m gylio ežero dugno į vandens paviršių iškilusio oro burbuliuko tūris? Vandens temperatūra prie ežero dugno ir prie paviršiaus vienoda. Atmosferos slėgį laikykite lygiu 10^5 Pa.

9. 30 K temperatūros idealiųjų dujų pradinis slėgis ir tūris atitinkamai lygūs 9 Pa ir 2 m^3, galinis slėgis 2 Pa. Nubraižykite šių dujų izoterminio proceso grafiką.

10. Remdamiesi idealiųjų dujų proceso grafiku, nubraižykite šio proceso grafikus (*p*, *T*) ir (*V*, *T*) koordinačių sistemose. Pradinės *1* būsenos dujų temperatūra lygi 250 K.



44. Idealiųjų dujų dėsniai

Iš 115 lygties akivaizdžiai įsitikinome, kad trys fizikiniai dydžiai (slėgis, tūris ir temperatūra) pilnai apibūdina bet kurią dujų būseną. Jie vadinami *termodinaminiais dujų parametrais*.

Remiantis matematiniais samprotavimais, galima teigti, kad vienam iš šių parametrų kintant, būtinai turi kisti dar bent vienas arba net kiti du parametrai. Jiems kintant, vyksta idealiųjų dujų procesai. **Procesai, kurių metu masė ir vienas iš trijų termodinaminių parametrų – *p*, *V* arba *T* – nekinta, vadinami izoprocèsais** (gr. *izos* – vienodas). Izoprocesai yra trejopi: **izotèrminis, kai, dujas pervedant iš vienos būsenos**

į kitą, išlieka pastovi temperatūra; izobãrinis, – kai išlieka pastovus slėgis (gr. *baros* – sunkumas) ir **izochòrinis, – kai išlieka pastovus tūris** (gr. *chora* – erdvė). Izoprocesai nuolat vyksta atmosferoje, jie plačiai taikomi technikoje.

Slėgio priklausomybę nuo tūrio, esant pastoviai temperatūrai (T = const), pirmasis 1662 m. paskelbė anglų mokslininkas Robertas Boilis (*Boyle*), o praėjus 14 metų prancūzų fizikas Edmas Mariotas (*Mariotte*), nepriklausomai nuo Boilio tyręs dujas, paskelbė analogiškus savo darbus. Mariotas geriau už Boilį suprato šio dėsnio reikšmę ir numatė įvairius jo taikymo būdus, iš kurių svarbiausias – vietovės aukščio nustatymas pagal barometrinį slėgį. Be to, Mariotas tyrė įvairių dujų savybes ne tik kai jos slegiamos, bet ir kai retinamos pastovios temperatūros sąlygomis.

Apibendrinus tyrimų rezultatus, buvo suformuluotas **Bòilio ir Mariòto dė́snis: tos pačios dujų masės slėgio p ir tūrio V sandauga yra pastovus dydis.**

Matematiškai jį užrašome taip: $p_1V_1 = p_2V_2 = p_3V_3 = ... = p_nV_n$ arba trumpiau

$$pV = \text{const.} \qquad (116)$$

Darome išvadą, kad dujų slėgis yra atvirkščiai proporcingas tūriui:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \qquad (117)$$

Slėgio priklausomybės nuo tūrio grafikas – hiperbolė. Kadangi ši kreivė vaizduoja procesą, kurio metu temperatūra yra pastovi, tai ji vadinama *izotermè*, o pats procesas – izoterminiu. Kuo aukštesnė temperatūra, tuo aukščiau yra izotermė (89 pav.).

Boilio ir Marioto dėsnis paaiškinamas molekulių koncentracijos (tankio) kitimu kintant, pavyzdžiui, tūriui. Tūriui padidėjus n kartų, tiek pat kartų sumažėja molekulių smūgių į indo sieneles skaičius, kartu sumažėja ir slėgis. Ir atvirkščiai, sistemai suteiktas šilumos kiekis suvartojamas dujų plėtimosi darbui prieš išorės slėgimo jėgas atlikti. Plėtimosi darbo skaitinė vertė lygi plotui po kreive (82 pav.).

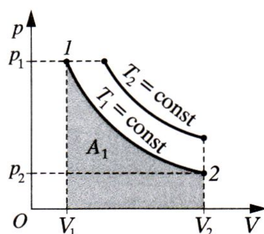
Boilio ir Marioto dėsnis galioja tik nedidelių slėgių ir gana aukštų temperatūrų srityje.

1802 m. prancūzų fizikas Žozefas Gei-Liusakas (*Gay-Lussac*; 1778–1850) eksperimentiniu būdu tyrinėjo įvairių dujų šiluminio plėtimosi koeficientus. Kietųjų kūnų ir skysčių plėtimosi koeficientai tuo metu jau buvo žinomi ir apskaičiuoti.

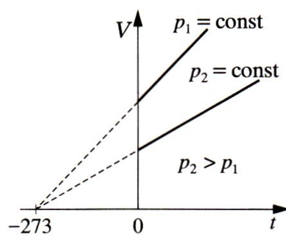
Procesas, kurio metu, esant pastoviam slėgiui (p = const), dujų tūris kinta tiesiogiai proporcingai temperatūrai, vadinamas izobariniu procesu. Jam galioja *Gei-Liusãko dėsnis*, kuris užrašomas taip:

$$V = V_0(1 + \beta t) \quad \text{arba} \quad V = \beta V_0 T; \qquad (118)$$

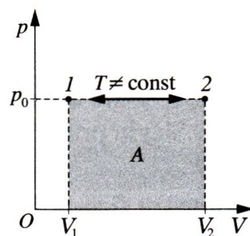
čia V_0 – idealiųjų dujų tūris, kai T_0 = 273 K, t. y. t = 0 °C, o $\beta = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273\ K}$ – **temperatūrinis dujų tūrio plėtimosi koeficientas, apibūdinantis santykinį tūrio padidėjimą temperatūrai pakitus vienu kelvinu.** Gei-Liusakas eksperimentiškai atrado ir teoriškai įrodė, kad **visų dujų šiluminio plėtimosi koeficientai yra vienodi ir lygūs $\frac{1}{273\ \text{K}}$.**



82 pav.



83 pav.



84 pav.

Iš idealiųjų dujų būvio lygties (115) Gei-Liusako dėsnį galima išreikšti ir taip:

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{T_1}{T_2}. \tag{119}$$

Šios lygties grafikas yra tiesė (83 pav.), vaizduojanti dujų tūrio priklausomybę nuo temperatūros, kai slėgis yra pastovus. Ji vadinama *izobarė*. Kuo mažesnis dujų slėgis, tuo aukščiau yra izobarė (84 pav.).

Žemų temperatūrų srityje izobarės turėtų kirsti temperatūrų ašį taške –273 °C. Bet tai nereiškia, jog dujų tūris gali sumažėti iki nulio. Visos dujos smarkiai atšaldytos suskystėja, todėl grafikų dalys, kai temperatūros yra žemos, nubrėžtos punktyrine linija.

Dujų tankis yra atvirkščiai proporcingas jų tūriui. Kylant temperatūrai, dujų tankis mažėja ir lygus

$$\rho=\frac{\rho_0}{1+\beta}. \tag{120}$$

Sistemai suteiktas šilumos kiekis sunaudojamas jos vidinei energijai padidinti (didėja T) ir plėtimosi darbui atlikti. Šio darbo skaitinė vertė lygi grafiko ribojamo daugiakampio plotui (84 pav.).

Prancūzų mokslininkas Žakas Šarlis (*Charles*; 1746–1823) išgarsėjo tuo, kad 1783 m., stebint šimtams tūkstančių žiūrovų, pirmasis žmonijos istorijoje pakilo balionu, pripildytu ne karšto oro, o naujai atrastų, lengvesnių už orą, vandenilio dujų. Tačiau fizikoje Ž. Šarlį išgarsino ne sensacingas skrydis, o tai, kad 1787 m. jis ištyrė, kaip įvairių dujų slėgis priklauso nuo temperatūros.

Uždarame inde kaitinamos dujos negali plėstis, todėl didėja jų slėgis į indo sieneles – vyksta izochorinis procesas, kurio metu keičiasi slėgis, ir jo priklausomybė nuo temperatūros apibūdinama pagal dėsnį

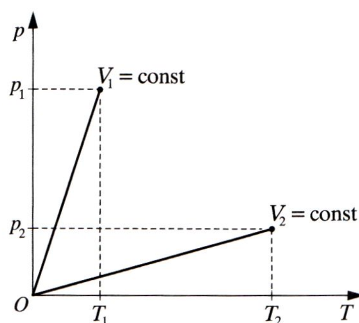
$$p=p_0(1+\gamma\Delta t); \tag{121}$$

čia p_0 – dujų slėgis esant 0 °C, o γ – dujų temperatūrinis slėgio koeficientas esant pastoviam tūriui. Idealiųjų dujų temperatūrinis slėgio koeficientas yra lygus temperatūriniam dujų tūrio plėtimosi koeficientui ($\gamma = \beta$). Koeficientas γ apibūdinamas formule $\gamma=\frac{p-p_0}{p_0\Delta t}$. Iš jos išplaukia, kad **temperatūrinis slėgio koeficientas parodo, kuria pradinio slėgio dalimi pasikeitė dujų slėgis, temperatūrai pakitus vienu laipsniu.**

Apskaičiavęs įvairių dujų temperatūrinius slėgio koeficientus, Šarlis pastebėjo, kad **visų dujų temperatūrinis slėgio koeficientas yra lygus temperatūriniam dujų tūrio plėtimosi koeficientui:** $\gamma=\beta=\frac{1}{273\ \text{K}}$.

Ž. Šarlio dėsnio fizikinė esmė glūdi tame, kad, **esant dujų tūriui pastoviam, jų slėgis yra tiesiogiai proporcingas absoliučiajai temperatūrai:**

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \qquad (122)$$

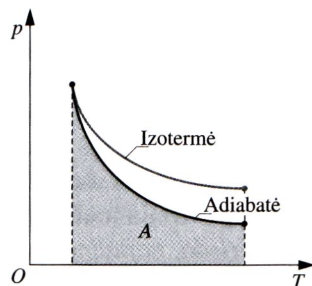


85 pav.

Grafiškai šis procesas vaizduojamas tiese, kuri vadinama *izochorė* (85 pav.). Iš grafiko matyti, jog kuo mažesnis dujų tūris, tuo aukščiau yra izochorė.

Sistemai suteiktas šilumos kiekis, esant pastoviam tūriui, sunaudojamas tik jos vidinei energijai pakeisti, o darbas nėra atliekamas ($A = 0$).

Adiabātiniu vadinamas toks termodinaminis procesas, kurio metu dujų sistema nesikeičia šiluma su aplinka ($\Delta Q = 0$). Taip besiplėsdamos dujos atvėsta ir atlieka mažesnį darbą, palyginus su izoterminio plėtimosi darbu (86 pav.). Todėl adiabātė yra statesnė už izotermę.



86 pav.

Visi aptarti dėsniai taikomi idealiosioms dujoms.

Jeigu inde yra kelių chemiškai tarp savęs nereaguojančių dujų mišinys, tai jo slėgis lygus sumai slėgių, kuriuos sudarytų kiekviena atskira mišinio komponentė, jei ji viena užimtų visą indą. Šį dėsnį atrado mokslininkas Daltonas, kurio vardu jis ir pavadintas. Matematiškai Daltono dėsnis užrašomas taip:

$$p = p_1 + p_2 + ... + p_n. \qquad (123)$$

Klausimai ir užduotys

1. Paaiškinkite dujų dėsnius molekulinės kinetinės teorijos požiūriu.

2. 12 l talpos indas, kuriame esančių dujų slėgis $4 \cdot 10^5$ Pa, sujungiamas su kitu 3 l talpos tuščiu indu. Koks bus galutinis slėgis, jei procesas izoterminis?

3. Kodėl visų izobarių ir izochorių tęsiniai susikerta viename taške?

4. Nubraižykite izobarę ir izochorę (p, V) koordinačių sistemoje.

5. Kodėl dviračio padangos, įšilusios saulėje, darosi standesnės?

6. Pro gyvenamojo namo ventiliacijos vamzdį iš lauko patenka –26 °C temperatūros oras. Kokį tūrį užims kiekvienas lauko oro kubinis metras, kambaryje įšilęs iki 23 °C?

7. Indą su $1{,}4 \cdot 10^5$ Pa slėgio dujomis sujungus su tuščiu 6 l talpos indu, juose nusistovi $1 \cdot 10^5$ Pa slėgis. Koks pirmojo indo tūris (procesas izoterminis)?

8. Gaminama elektros lempa paprastai pripildoma $5{,}065 \cdot 10^4$ Pa slėgio 288 K temperatūros azoto. Kokia yra šviečiančios lempos dujų temperatūra, jeigu slėgis pakyla iki $1{,}1 \cdot 10^5$ Pa?

9. Uždarame balione esančias dujas pakaitinus nuo 300 K iki 360 K, slėgis padidėjo 8 atm. Raskite pradinį dujų slėgį. Baliono plėtimosi nepaisykite.

10. Kol dujų burbuliukas pakyla nuo ežero dugno iki paviršiaus, jo tūris padidėja tris kartus. Koks yra to ežero gylis?

8 SKYRIUS. GARŲ, SKYSČIŲ IR KIETŲJŲ KŪNŲ SAVYBĖS

45. Garavimas ir kondensacija

Gerai užsuktas kvepalų flakonas ar acetono buteliukas gali stovėti labai ilgai, ir skysčio kiekis jame nepakis. Jeigu šiuos indus paliksime atvirus, tai po tam tikro laiko jie bus tušti, nes šie skysčiai išgaruos. Daug greičiau išgaruoja vanduo, išpiltas ant grindų, išdžiūva šlapi skalbiniai ar maža balutė, kai aplinkos temperatūra yra aukšta ir pučia vėjas.

Šį reiškinį galima paaiškinti molekulinės kinetinės teorijos požiūriu.

Skystyje molekulės juda netvarkingai. Kuo aukštesnė skysčio temperatūra, tuo didesnė molekulių kinetinė energija. Molekulių vidutinės kinetinės energijos vertė tam tikroje temperatūroje yra apibrėžto didumo, nors kažkuriuo momentu atskirų molekulių kinetinė energija gali būti tokia didelė, kad jos įveiks kitų (kaimyninių) molekulių traukos jėgas ir išlėks iš skysčio.

Procesas, kurio metu iš skysčio arba kietojo kūno išlekia molekulės, kurių kinetinė energija viršija molekulių sąveikos potencinę energiją, vadinamas garãvimu. *Kietųjų kūnų (ledo, naftalino) garavimas vadinamas sublimãcija.*

Iš skysčio, esančio atvirame inde, išlėkusi molekulė juda netvarkingai (šiluminis dujų judėjimas) ir gali nuo jo paviršiaus nutolti arba sugrįžti atgal į skystį.

Procesas, kurio metu garų (dujų) molekulės grįžta atgal į skystį, vadinamas kondensãcija.

Kai oro srautas virš indo nusineša susidariusius garus, skystis garuoja greičiau, nes sumažėja garų molekulių tikimybė grįžti atgal į skystį. Kuo aukštesnė skysčio temperatūra, tuo didesnis molekulių judėjimo greitis, o tuo pačiu ir kinetinė energija. Tuomet molekulėms lengviau atsiskirti nuo bendros skysčio masės, ir skystis greičiau garuoja. **Garavimo greitis priklauso nuo kūno prigimties, nuo jo paviršiaus ploto ir nuo slėgio virš jo.**

Kadangi skystį palieka pačios greičiausios, turinčios didžiausią kinetinę energiją molekulės, todėl likusių skystyje molekulių vidutinė kinetinė energija mažėja – temperatūra krinta – skystis aušta. Tai vyksta todėl, kad garavimui sunaudojama paties skysčio šiluma (vidinė energija). Kad garuojant temperatūra nemažėtų, skystį reikia šildyti. **Šilumos kiekis, reikalingas 1 kg skysčio išgarinti pastovioje temperatūroje, vadinamas savitąja garãvimo šilumà ir randamas pagal formulę:** $L = \frac{Q}{m}$. Dydis L priklauso nuo skysčio prigimties ir temperatūros; Q – šilumos kiekis; m – išgaravusio skysčio masė. Įvairių skysčių savitoji garavimo šiluma randama žinynuose, fizikinių dydžių lentelėse.

Iš pastarosios lygties užrašome šilumos kiekio, reikalingo skysčiui išgarinti esant jo garavimo temperatūrai, apskaičiavimo formulę:

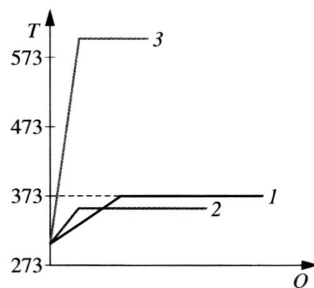
$$Q = Lm. \quad (124)$$

Skysčio savybė (intensyviai garuojant) staigiai ataušti taikoma medicinoje – skausmingoms vietoms atšaldyti naudojami tokie preparatai, kaip amoniakas, skystas azotas ir kt.

Neleidžiant garuoti, skystis aušta daug lėčiau. Pavyzdžiui, riebalų sluoksnis ant sriubos paviršiaus neleidžia jai greitai atvėsti, nes greitoms vandens molekulėms išlėkti į išorę trukdo didelės riebalų molekulės, kurios yra tvirčiau sukibusios viena su kita negu vandens molekulės.

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl padžiauti drėgni skalbiniai, nupjauta žolė greičiau išdžiūsta vėjuotu oru?
2. Kodėl vanduo atvirame inde visada būna vėsesnis už aplinkos orą?
3. Kodėl plaukikas, išėjęs iš vandens, jaučia šaltį, ypač pučiant vėjui?
4. Kodėl lyjant oras atvėsta?
5. Pelkėtose vietose karštą orą kęsti sunkiau negu sausose. Kodėl?
6. Paaiškinkite, kodėl, vilkint guminiu drabužiu, sunkiau kęsti karštį.
7. Ar gali garuoti kietasis kūnas? Atsakymą pagrįskite.
8. Kodėl vanduo gesina ugnį? Kas greičiau užgesins liepsną – verdantis vanduo ar šaltas?
9. Kuo dujinė kaitinamoji lempa pranašesnė už vakuuminę?
10. Grafike parodyta, kaip kinta trijų skirtingų skysčių temperatūra. Jie kaitinami suteikiant vienodus šilumos kiekius per lygius laiko tarpus. Skysčių masės vienodos. Nustatykite, kokie tie skysčiai.



11. Kiek išsiskirs šilumos, kol susikondensuos 200 g vandens garų, kurių temperatūra 100 °C?

46. Sotieji ir nesotieji garai

Pastovios temperatūros skysčiui garuojant uždarame inde, laipsniškai didėja virš skysčio susidariusių garų molekulių koncentracija. Po tam tikro laiko koncentracija pasiekia tokią vertę, kad per laiko vienetą į skystį grįžta tiek pat molekulių, kiek jų per tą patį laiką išlėkė iš skysčio paviršiaus. Tarp skysčio garavimo ir kondensacijos procesų nusistovi *dinãminė pusiáusvyra*.

Garai, esantys su skysčiu dinaminėje pusiausvyroje, vadinami sočiaĩsiais.

Remiantis šiuo apibrėžimu, galima daryti išvadą, kad, esant tam tikrai temperatūrai, tam tikro tūrio inde negali būti daugiau garų. Jeigu iš indo, kuriame yra skystis, išsiurbsime orą, tai virš skysčio bus tik sotieji garai.

Garai, kurių slėgis mažesnis negu sočiųjų, vadinami nesočiaĩsiais.

Slegiant sočiuosius garus, jų molekulių koncentracija didėja, pusiausvyra tarp garavimo bei kondensacijos sutrinka; vis didesnė jų dalis suskystėja. Tam tikros masės skystis užima mažesnį tūrį negu tos pačios masės garai. Todėl garų tūris mažėja, o tankis nekinta.

Plečiantis sotiesiems garams, jų molekulių koncentracija mažėja, ir dalis skysčio virsta garais. Taigi sočiųjų garų koncentracija būna pastovi, nepriklausoma nuo tūrio.

Kadangi dujų slėgis proporcingas koncentracijai ($p = nkT$), tai **pastovios temperatūros sočiųjų garų slėgis nepriklauso nuo tūrio.**

Garų, kurie yra pusiausvyroje su savo skysčiu, slėgis p_0 vadinamas sočiųjų garų slėgiu.

Skysčio temperatūrai didėjant, jis garuoja intensyviau, todėl dinaminė pusiausvyra tarp garavimo ir kondensacijos nusistovi padidėjus dujų molekulių koncentracijai.

Kai dujų molekulių koncentracija pastovi, idealiųjų dujų slėgis didėja tiesiogiai proporcingai absoliučiajai temperatūrai.

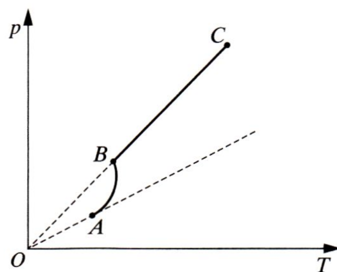
Kadangi, kylant temperatūrai, sočiųjų garų molekulių koncentracija didėja, tai didėja ir jų slėgis, tik sparčiau negu idealiųjų dujų, kurių molekulių koncentracija yra pastovi.

Galima daryti išvadą, jog tarp sąvokų „dujos" ir „garai" nėra jokio skirtumo, nes šie žodžiai yra vienareikšmiai. Tačiau jeigu, nekeičiant temperatūros ir slegiant, dujas galima paversti skysčiu, tai jos vadinamos nesočiaisiais garais. Pradėdami skystėti, garai, esantys pusiausvyroje su skysčiu, virsta sočiaisiais.

47. Sočiųjų garų slėgio priklausomybė nuo temperatūros. Virimas. Kritinė temperatūra

Sočiųjų garų būsena nustatoma pagal lygtį $pV = \frac{m}{M}RT$, o jų slėgis – pagal formulę $p_0 = nkT$.

Kylant temperatūrai, slėgis didėja. **Kadangi sočiųjų garų slėgis nepriklauso nuo tūrio, vadinasi, jis priklauso tik nuo temperatūros.**



87 pav.

Temperatūrai kylant, sočiųjų garų slėgis didėja greičiau negu idealiųjų dujų (87 pav., kreivės dalis AB). Tai labai akivaizdu, nubrėžus per tašką A izochorę (punktyrinė tiesė). Tai vyksta todėl, kad, kaitinant skystį uždarame inde, dalis skysčio išgaruoja. Iš formulės matyti, kad sočiųjų garų slėgis didėja ne vien kylant temperatūrai, bet ir didėjant garų molekulių koncentracijai (tankiui). *Slėgio didėjimą kylant temperatūrai lemia koncentracijos didėjimas.*

Pagrindinis skirtumas tarp idealiųjų dujų ir sočiųjų garų yra tas, kad, kintant uždarame inde sočiųjų garų temperatūrai (arba kintant tūriui, kai temperatūra pastovi), kinta garų masė. Dalis skysčio išgaruoja arba atvirkščiai, dalis garų kondensuojasi. Kitaip yra su idealiosiomis dujomis.

Kai visas skystis išgaruoja, toliau kaitinami garai nustoja būti sočiaisiais ir jų slėgis pasidaro tiesiogiai proporcingas absoliučiajai temperatūrai (87 pav., dalis BC).

Kylant skysčio temperatūrai, garavimo intensyvumas didėja.

Esant 40 °C– 80 °C temperatūrai, vandenyje atsiranda burbuliukų, kuriuose yra oro ir vandens garų. Vandenį toliau šildant, burbuliukai didėja, nes didėja jų tūris ir, Archimedo jėgos veikiami, jie kyla į viršų ir sprogsta išleisdami vandens garus. Šio proceso metu skysčio virimo temperatūra lieka pastovi.

Garų burbuliukai gali didėti tik tada, kai jų viduje esančių sočiųjų garų slėgis yra didesnis (ribiniu atveju – lygus) už skysčio slėgį, kuris lygus oro slėgio skysčio paviršiuje (išorinio slėgio) ir skysčio stulpelio (hidrostatinio) slėgio sumai:

$$p_0 \geq p_{at} + \rho g h.$$

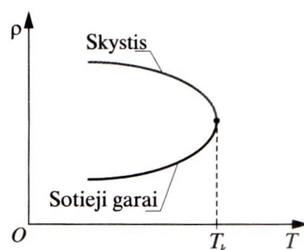
Skystis pradeda virti esant tokiai temperatūrai, kai jo sočiųjų garų slėgis burbuliukuose susilygina su slėgiu skystyje.

Kuo didesnis išorinis slėgis, tuo aukštesnė virimo temperatūra. Pavyzdžiui, garo katile, kuriame slėgis siekia $1{,}6 \cdot 10^6$ Pa, vanduo neverda ir įkaista iki 200 °C temperatūros. Medicinos įstaigose vanduo virinamas hermetiškai uždarytuose induose – *autoklāvuose*, kuriuose yra padidintas slėgis. Tokiuose induose virimo temperatūra aukštesnė negu 100 °C. Autoklavuose sterilizuojami chirurginiai instrumentai, tvarstymo medžiagos ir t. t.

Jei išorinį slėgį mažiname, mažiname ir virimo temperatūrą. Pavyzdžiui, siurbliu išsiurbiant orą ir vandens garus iš kolbos, vandenį galima užvirinti kambario temperatūroje. Kylant į kalnus, atmosferos slėgis mažėja, krinta ir virimo temperatūra. Pavyzdžiui, Kazbeko viršukalnėje (5043 m virš jūros lygio), kur atmosferos slėgis yra apie 400 mmHg, vanduo užverda 83 °C temperatūroje, o Everesto viršukalnėje, esant 230 mmHg slėgiui, – 70 °C temperatūroje. Mėsos išvirti tokiomis sąlygomis neįmanoma.

Įvairių skysčių virimo temperatūra nevienoda, nes skirtingas tų skysčių sočiųjų garų slėgis. Kuo didesnis sočiųjų garų slėgis, tuo žemesnė atitinkamo skysčio virimo temperatūra, nes žemesnėje temperatūroje sočiųjų garų slėgis susilygina su atmosferos slėgiu. Pavyzdžiui, esant 100 °C virimo temperatūrai, vandens sočiųjų garų slėgis lygus $1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa, o gyvsidabrio – 117 Pa. Gyvsidabris verda esant 357 °C temperatūrai, kai išorinis slėgis normalus.

Kylant skysčio temperatūrai, didėja sočiųjų garų slėgis, o tuo pačiu ir jų tankis. **Skysčio, pusiausviro su savo garais, tankis, atvirkščiai slėgiui, mažėja, nes kaitinamas skystis plečiasi.** Jeigu vienoje koordinačių sistemoje nubraižytume skysčio ir garų tankio priklausomybės nuo temperatūros kreives, tai skystį atitinkanti kreivė leistųsi žemyn, o garus atitinkanti – kiltų aukštyn (88 pav.).



88 pav.

Esant vadinamajai kritinei temperatūrai, abi kreivės susijungia, t. y. skysčio tankis tampa lygus garų tankiui.

Temperatūra, kuriai esant išnyksta skirtumas tarp skysčio ir jo sočiųjų garų fizinių savybių, vadinama kritine. Pirmasis šią sąvoką pavartojo D. Mendelejevas.

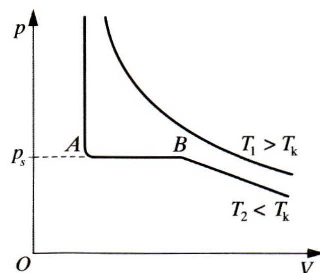
Esant kritinei temperatūrai, sočiųjų garų tankis (ir slėgis) yra didžiausias, o skysčio, pusiausviro su garais, – mažiausias. Kritinės temperatūros fizikinė esmė yra ta, kad už ją aukštesnės temperatūros dujų suskystinti negalima, kad ir koks bebūtų slėgis.

Tik ribotame temperatūrų ir slėgio diapazone galima taikyti idealiųjų dujų modelį gamtoje esančių dujų savybėms nusakyti. Kai dujų temperatūra nukrinta žemiau kritinės, jau negalima nepaisyti molekulių traukos jėgų. Esant pakankamai dideliam slė-

giui, medžiagos molekulės susijungia viena su kita. **Dujos, kurių temperatūra yra žemesnė už kritinę, yra nesotieji garai.**

Galima daryti išvadą, kad, esant kritinei temperatūrai, skysčio ir sočiųjų garų savybės yra sunkiai atskiriamos. Aukštesnės negu kritinės temperatūros skysčio būti negali.

Kadangi realiosios dujos gali virsti skysčiu, tai jų izotermės yra hiperbolės tik tuomet, kai temperatūra yra aukštesnė už kritinę (89 pav.).



89 pav.

Realiųjų dujų, kurių temperatūra T_2 ($T_2 > T_1$), izoterminis suslėgimas atitinka idealiųjų dujų izotermės lygtį iki tol, kol pasiekiamas slėgis, kuris lygus T_2 temperatūros sočiųjų garų slėgiui p_0. Ir toliau mažinant dujų užimamą tūrį, dinaminė pusiausvyra tarp garavimo ir kondensacijos sutrinka. Dalis dujų virsta skysčiu, o slėgis lieka pastovus ir lygus sočiųjų garų slėgiui.

Realiųjų dujų izotermės dalis AB atitinka dujų virsmą skysčiu.

Pastovaus slėgio dujų tūris mažėja tol, kol visos dujos inde virsta skysčiu. Toliau mažėjant tūriui, slėgis staigiai didėja. Tai paaiškinama mažu skysčių spūdumu.

Norint suskystinti bet kurias dujas, pirmiausia reikia jas atšaldyti iki temperatūros, žemesnės negu kritinė, po to – padidinti slėgį tiek, kad jis viršytų sočiųjų garų slėgį.

Klausimai ir užduotys

1. Koks procesas vyksta: džiūstant skalbiniams šaltyje, susidarant ledo raštams ant stiklo? rasojant akinių stiklams, kai žmogus iš lauko įeina į šiltą patalpą? susidarant šerkšnui ant medžių?

2. Kodėl, kaitinant vandenį, burbuliukai pirmiausia susidaro ant indo dugno?

3. Kodėl maistui gaminti kalnuose reikia daugiau laiko?

4. Kodėl skysčio virimo temperatūra priklauso nuo garų slėgio?

5. Įrodykite, kad vandens virimo temperatūra kyla didėjant slėgiui.

6. Kodėl virimui didesnę įtaką turi burbuliukuose esančių sočiųjų garų, o ne juose esančio oro slėgio padidėjimas?

7. Ar bulvės atvirame puode išvirs greičiau, jei jos virs smarkiau? o uždarame puode? Atsakymą pagrįskite.

8. Kaip galėtumėte atšaldyti butelį gėrimo karštą dieną, būdami prie ežero? Atsakymą pagrįskite.

9. Paaiškinkite, kodėl garuodamas vanduo atvėsta.

10. Koks yra skirtumas tarp garavimo ir virimo?

11. Kodėl garais nusideginama daug stipriau ir pavojingiau negu verdančiu vandeniu?

48. Oro drėgmė

Vanduo sudaro apie 70,8% Žemės paviršiaus. Gyvieji organizmai savyje turi 50–99,7% vandens. Atmosferoje vandens lašelių, sniego kristalų ir vandens garų pavidalu yra 13–15 tūkst. km^3 vandens. Nors Žemėje ir yra daug atvirų telkinių, tačiau vandens garai ore nėra sotieji. Judant oro masėms, vienose planetos vietose vandens išgaruoja daugiau, o kitose – mažiau. Tačiau ore visada yra tam tikras kiekis vandens garų, kurie vienaip ar kitaip daro įtaką orams ir klimatinėms sąlygoms Žemėje.

Nuo vandens garų kiekio priklauso oro drėgmė, kurią apibūdina *absoliučioji ir santykìnė óro drėgmẽ.*

Vandens garų slėgis (jei visų kitų dujų nebūtų) vadinamas vandens garų daliniù slėgiù arba absoliučią̃ja drėgmè. Kitaip tariant, absoliučiosios oro drėgmės skaitinė vertė lygi 1 m^3 oro esančių vandens garų masei. Šis dydis yra vienas iš oro drėgmės rodiklių, jis matuojamas slėgio vienetais – paskaliais (Pa) arba gyvsidabrio (stulpelio) milimetrais (mmHg).

Absoliučioji oro drėgmė neparodo, kaip toli vandens garai esamomis sąlygomis yra iki sočiųjų garų, nors nuo to priklauso vandens garavimo intensyvumas bei drėgmės kiekis, kurio netenka gyvieji organizmai. Maksimalus vandens garų kiekis būna atvirame ore pavasarį sniegui tirpstant arba po lietaus. Tai priklauso nuo temperatūros: orui atšalus, jį sudarančių molekulių, tarp jų ir vandens molekulių, greičiai sulėtėja, jos lengviau grįžta į skystį, todėl vėsesniame ore yra mažesnis vandens garų kiekis. Naktį, orui atšalus, dalis jų iškrinta rasos ar šerkšno pavidalu. Ir, priešingai, pakilus oro temperatūrai, oras tampa mažiau prisotintas vandens garų. Sakome, kad *prisotinto oro drėgmė yra 100%.* Tam tikslui įvedama santykinės drėgmės sąvoka.

Santykinės oro drėgmės φ skaitinė vertė lygi absoliučiosios drėgmės santykiui su ta vandens garų mase, kuri sotintų tokios pat temperatūros orą. Ji rodo, kiek oro būsena skiriasi nuo jo įsotinimo vandens garais būsenos. Santykinė drėgmė išreiškiama vandens garų tankių arba juos atitinkančių slėgių santykiu ir pateikiama procentais:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} 100\% \quad \text{arba} \quad \varphi = \frac{p}{p_0} 100\%. \qquad (125)$$

Sočiųjų vandens garų tankis ρ_0 ir jų slėgis p_0 priklauso nuo temperatūros. Jų vertės nurodomos lentelėse.

Kuo žemesnė temperatūra, tuo mažesnis sočiųjų garų slėgis. Todėl, aušinant orą, jame esantys vandens garai tam tikroje temperatūroje virsta sočiaisiais. **Temperatūra t_r, kurioje ore esantys vandens garai virsta sočiaisiais, vadinama rasõs taškù.**

Žinant rasos tašką, galime rasti ore esančių vandens garų slėgį p_1. Jis lygus sočiųjų garų slėgiui temperatūroje t_1, kuri lygi rasos taškui. Radus garų slėgį p_1 ir sočiųjų vandens garų slėgį p_0 šioje temperatūroje, pagal 125 lygtį galima apskaičiuoti santykinę oro drėgmę.

Drėgmė matuojama specialiu prietaisu – *higrometrù* (gr. *higros* – drėgnas, *metron* – matas). Paprasčiausiame higrometre panaudota žmogaus švaraus plauko savybė – ilgėti didėjant oro drėgmei.

Kitas prietaisas drėgmei matuoti – *psichromètras* (gr. *psychros* – šaltas, *metron* – matas). Jį sudaro du termometrai: vieno rezervuaras yra sausas ir jis rodo oro temperatūrą (98 pav.). Antrojo termometro rezervuaras apvyniotas skudurėliu, kurio galas įmerktas į vandenį. Vandeniui garuojant, antrasis termometras atvėsta. Kuo didesnė santykinė drėgmė, tuo mažesnis garavimo intensyvumas. Pagal abiejų termometrų temperatūrų skirtumą specialiose lentelėse galima rasti oro drėgmę.

Žmogaus savijauta geriausia, kai oro drėgmė yra 40%–60%, todėl tokią drėgmę stengiamasi palaikyti kosminių erdvėlaivių kabinose. Garindamas per odą prakaitą, žmogaus organizmas reguliuoja kūno temperatūrą. Esant didelei drėgmei, tas reguliavimo mechanizmas sutrinka. Tuo tarpu šuo prakaito liaukų beveik neturi, tad jis per karštymetį ar po greito bėgimo lekuoja – garina vandenį iš organizmo per gerklę bei bronchus ir taip vėsinasi.

Didėjant oro temperatūrai, jo santykinė drėgmė mažėja. Todėl, vėdinant kambarius žiemą, juose oro drėgmė krinta. Esant 10%–20% oro drėgmei, džiūsta kvėpavimo takų gleivinė, ir lengvai peršąlama. Antra vertus, norėdami pašalinti iš namų per didelę drėgmę, pavyzdžiui, džiūstant skalbiniams, šaltu oru atidarome langelį net ir tada, kai lauke lyja.

Oro drėgmės nustatymas turi didelę reikšmę meteorologijoje sudarant oro prognozes. Kad ir nedidelis garų kiekis yra atmosferoje (apie 1%), bet jis labai svarbus atmosferos reiškiniams. Kondensuojantis vandens garams, susidaro debesys, po to iškrinta krituliai ir išsiskiria daug šilumos. Tuo tarpu vandeniui garuojant, šiluma absorbuojama.

Audžiant audinius, gaminant verpalus ar konditerijos gaminius, taip pat reikalinga tam tikra drėgmė. Meno kūrinių bei knygų išsaugojimui labai svarbu palaikyti pastovią oro drėgmę, todėl muziejuose, bibliotekose, archyvuose naudojami psichrometrai arba jautrūs higrometrai.

Klausimai ir užduotys

1. Kur daugiau vandens garų – šaltame ar šiltame ore, jei jų santykinė drėgmė yra vienoda?

2. Kodėl apsivilkus guminiais drabužiais sunku dirbti?

3. Londonas garsėja savo rūkais. Tačiau pastaraisiais dešimtmečiais Londono rūkai tapo retesni. Viena iš priežasčių yra ta, jog londoniečiai beveik nebenaudoja šildymui akmens anglies. Paaiškinkite ryšį tarp šių reiškinių.

4. Kodėl po tankiu medžiu nebūna rasos?

5. Ką rodo psichrometro termometrai, kai santykinė drėgmė lygi 100%?

6. Kai temperatūra 15 °C, 120 m^3 tūrio kambaryje santykinė oro drėgmė lygi 60%. Sočiųjų garų slėgis 15 °C temperatūroje lygus 12,8 mmHg. Apskaičiuokite kambario ore esančių vandens garų masę.

7. Kombainininkui reikia iš anksto žinoti, ar galės pjauti javus kitą rytą – ar nebus rasos. Radijas pranešė, kad vakare oro temperatūra 20 °C, santykinė drėgmė 60%, o rytoj rytą temperatūra bus 12 °C. Ką turėtų nuspręsti kombainininkas?

8. 1100 m³ tūrio sporto salėje oro temperatūra yra 30 °C, santykinė drėgmė – 80%. Kokia salėje esančių vandens garų masė?

9. Debesies kūno tūris 2,5 · 10⁶ m³, santykinė oro drėgmė lygi 90%. Kiek vandens išsiskirs iš to debesies, jeigu jo temperatūra nukris nuo 20 °C iki 12 °C?

10. Kaip galima žiemą sumažinti santykinę oro drėgmę patalpoje, kurioje laikomi gyvuliai? Atsakymą pagrįskite, pateikdami keletą variantų.

11. Vakare paežerėje oro temperatūra lygi 18 °C, santykinė drėgmė – 75%. Kokiai temperatūrai esant paryčiais turėtų susidaryti rūkas?

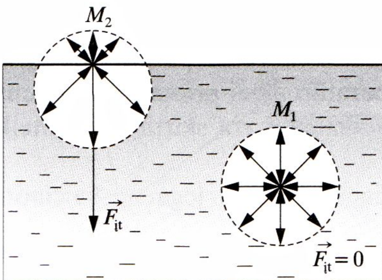
12. Kiek vandens gali išgaruoti į kambarį, kurio matmenys 10 · 8 · 4,5 m³, jeigu oro temperatūra 22 °C, o santykinė drėgmė 70%; jeigu temperatūra 25 °C, o rasos taškas 11 °C?

49. Skysčio paviršiaus savybės

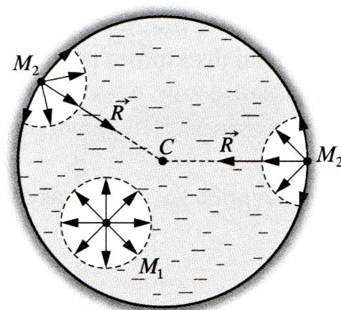
Bet kurią skysčio vidinių sluoksnių molekulę M_1 veikia kaimyninės molekulės jėgomis, kurių atstojamoji artima nuliui (90 pav.). Skystį ir jo garus skiriančio paviršinio sluoksnio molekulių M_2 sąveikos jėgų atstojamoji nukreipta žemyn, į skystį, nes garų molekulių yra mažiau negu skysčio. Ši statmena paviršiui jėga sukelia paviršinio sluoksnio molekulinį slėgį. Jo veikiamos paviršinio sluoksnio molekulės, jei tik gali, pereina į gilesnius skysčio sluoksnius, ir skysčio paviršiaus plotas sumažėja. Kuo mažesnis paviršiaus plotas, tuo mažesnė jo energija ir stabilesnė būsena. *Mažiausias vienodo tūrio geometrinių figūrų paviršiaus plotas yra rutulio paviršiaus plotas. Todėl bet kuris skystis, neveikiamas išorinių jėgų, įgauna rutulio formą.*

Norint padidinti skysčio paviršiaus plotą, reikia atlikti darbą prieš paviršiaus įtempimo jėgas. Mat paviršinio sluoksnio molekulė M_1 (91 pav.) sąveikauja ne tik su gilesnių sluoksnių molekulėmis, bet ir su gretimomis to paties sluoksnio molekulėmis. Tačiau išilgai skysčio paviršiaus jėgų atstojamoji lygi nuliui. Prie pat paviršiaus krašto esančias molekules M_2 veikia nelygi nuliui atstojamoji jėga $\vec{F}_{\text{įt}}$. Šios jėgos kryptis statmena laisvojo paviršiaus ribai ir sutampa su paviršiaus liestine.

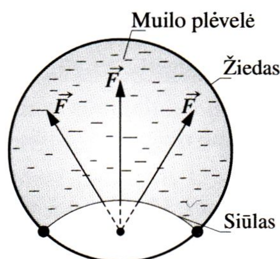
Taigi paviršinio sluoksnio molekulių sąveikos jėgos nukreiptos paviršiaus liestinės kryptimi į paviršiaus centrą. Dėl šios priežasties ištempiamas siūlas žiede (92 pav.), vienoje jo pusėje pradūrus muilo plėvelę.



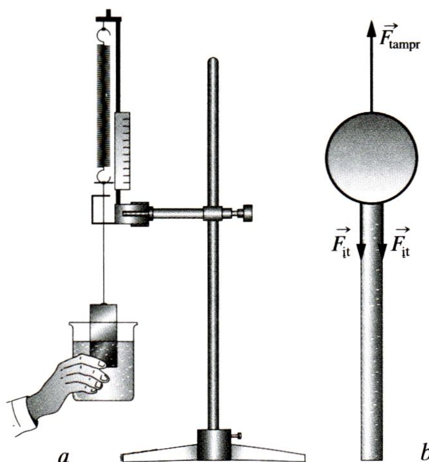
90 pav.



91 pav.



92 pav.



93 pav.

Atlikime tokį bandymą. Prie spyruoklinio dinamometro kabliuko horizontaliai pritvirtinkime vielą, kurios ilgis l. Vielos sunkio veikiama, dinamometro spyruoklė išsitemps. Dinamometro skalės nulinę padalą nustatykime ties jo rodykle, kad galėtume atsižvelgti į pradinį spyruoklės išsitempimą.

Vielą panardinkime į vandenį, paskui indą su vandeniu iš lėto leiskime žemyn (93 pav., *a*). Bandymo metu akivaizdžiai matyti, kad išilgai vielos susidaro skysčio plėvelė ir dinamometro spyruoklė išsitempia. Iš dinamometro parodymų galima nustatyti paviršiaus įtempimo jėgą. Kadangi skysčio plėvelė turi du paviršius, tai tamprumo jėgos modulis lygus dvigubam įtempimo jėgos moduliui (93 pav., *b*): $F_{tampr} = 2F_{įt}$.

Jeigu šią vielą pakeistume dvigubai ilgesne viela, tai paviršiaus įtempimo vertė būtų dvigubai didesnė. Bandymai su skirtingo ilgio vielomis rodo, kad paviršiaus įtempimo jėgõs, veikiančios ilgio l paviršinį sluoksnį, modulio ir to ilgio santykis yra pastovus dydis, nepriklausantis nuo ilgio l. Jis vadinamas *paviršiaus įtempìmo koeficientù* ir žymimas graikiška raide σ (sigma):

$$\sigma = \frac{F_{įt}}{l}. \tag{126}$$

Paviršiaus įtempimo koeficientas matuojamas Niutonais metrui: $[\sigma] = \text{N/m}$. Iš pastarosios lygties matome, kad paviršiaus įtempimo koeficiento skaitinė vertė lygi jėgai, veikiančiai drėkinimo perimetro ilgio vienetą statmenai šiam perimetrui. Šis koeficientas priklauso nuo skysčio prigimties, jo temperatūros bei priemaišų koncentracijos, todėl įvairių skysčių paviršiaus įtempimo koeficientai yra skirtingi ir pateikiami žinynų lentelėse.

Iš 126 lygties galime užrašyti formulę paviršiaus įtempimo jėgai apskaičiuoti

$$F_{įt} = \sigma l. \tag{127}$$

Ši jėga proporcinga vielos ilgiui l ir nepriklauso nuo skysčio paviršiaus ploto, nes paviršiaus ploto vienete esančių molekulių skaičius nekinta.

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl aliuminio negalima lituoti įprastiniu (alavo) lydmetaliu? Muiluoto vandens paviršiaus įtempimas yra beveik du kartus mažesnis negu gryno vandens. Kodėl muiluotas vanduo sudaro tokius stiprius burbulus ir plėveles, kokių neįmanoma gauti iš gryno vandens?

2. Rutulio formos stiklinis indas iki trijų ketvirtadalių pripiltas vandens. Kas atsitiks su vandeniu nesvarumo sąlygomis? Kaip pasikeis tokio bandymo rezultatas vietoj vandens pripylus gyvsidabrio?

3. Rėmelis, ribojantis 40 cm^2 plotą, aptrauktas muilo plėvele. Kiek sumažės plėvelės energija, perpus sumažėjus jos plotui? (Temperatūra nekinta.)

4. Apskaičiuokite 50 mm skersmens muilo burbulo papildomą paviršiaus potencinę energiją.

5. Matuojant spirito paviršiaus įtempimo koeficientą, iš vertikaliai įtvirtintos 1,6 mm skersmens biuretės lašinta 100 lašų, kurių bendra masė 1,02 g. Kokia gauta paviršiaus įtempimo koeficiento reikšmė?

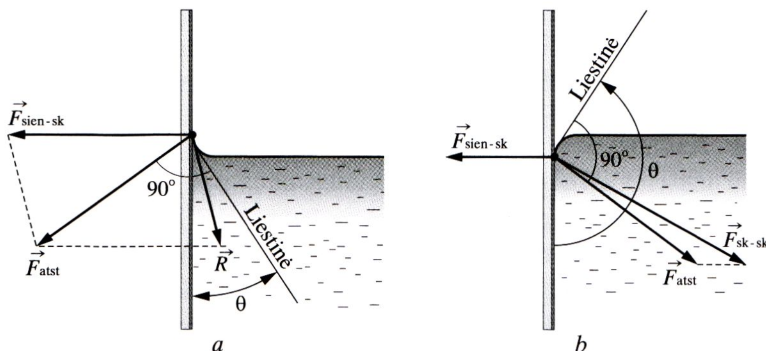
6. Žibalas varva iš biuretės pro 2 mm skersmens angelę ir kas sekundė nukrinta po vieną lašą. Per kiek laiko išlašės 25 cm^3 žibalo?

7. Į 6 cm^3 talpos vonelę laša 20 °C temperatūros vanduo iš vamzdelio, kurio vidinis skersmuo 1 mm. Kiek lašų turi išlašėti iš vamzdelio, kad pripildytų vonelę?

50. Drėkinimas. Kapiliariniai reiškiniai

Drėkinimas – tai skysčio laisvojo paviršiaus išlinkimas prie kietojo kūno paviršiaus. Toks **lenktas skysčio paviršius vadinamas meniskù. Menisko lietimosi su kietu kūnu linija vadinama drėkinimo perimetru.** Patį drėkinimo procesą aiškiname skysčio molekulių ir skysčio bei sienelių molekulių sąveikos jėgomis: kai skysčio molekulių tarpusavio traukos jėgos mažesnės už skysčio ir sienelių molekulių tarpusavio traukos jėgas, skystis sieneles drėkina.

Drėkinimas apibūdinamas sąlyčio kampu θ, kurį sudaro kietojo kūno paviršius su skysčio paviršiaus liestine, išvesta iš lietimosi taško *O* (94 pav.). Kai kampas

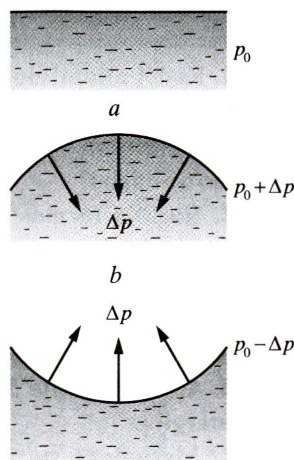


94 pav.

$\theta < 90°$ (94 pav., *a*), skystis kūną drėkina, o kai $\theta > 90°$ (94 pav., *b*) – nedrėkina. **Visiškai drėkinantis skystis** ($\theta = 0°$) **niekada nesudaro ant horizontalaus paviršiaus lašų.** Taip vanduo drėkina švarų stiklą. **Visiškai nedrėkinantis skystis** ($\theta = 180°$) **ant horizontalaus paviršiaus yra rutulio formos.**

Kreivas skysčio paviršius stengiasi išsitiesinti, t. y. sumažinti savo plotą, kartu ir paviršiaus laisvąją energiją. Dėl to atsiranda papildomas slėgis Δp, nukreiptas į paviršiaus kreivumo centrą (95 pav.), ir bendras slėgis po išgaubtu paviršiumi padidėja (95 pav., *a*), o po įgaubtu – sumažėja (95 pav., *b*). Papildomo slėgio dydis priklauso nuo paviršiaus įtempimo koeficiento σ ir nuo paviršiaus kreivumo spindulio *R*:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}. \qquad (128)$$



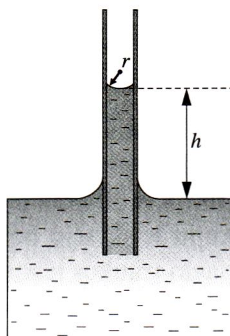
95 pav.

Papildomas slėgis sukelia kapiliārinius réiškinius: drėkinantysis skystis pakyla, o nedrėkinantysis nusileidžia žemyn siaurais vamzdeliais (96 pav.). Skysčio pakilimo ar nusileidimo kapiliaru aukštis *h* randamas iš sąlygos: skysčio stulpelio hidrostatinis slėgis lygus papildomam slėgiui po jo kreivu paviršiumi (atmosferos slėgį į skysčio paviršių inde kompensuoja atmosferos slėgis į skysčio paviršių kapiliare): $\rho g h = \frac{2\sigma}{r}$; čia r – kapiliaro vidinis spindulys (tiksliau, $\sigma g h = \frac{2\sigma\cos\theta}{r}$). Iš šios formulės išreikškime *h*:

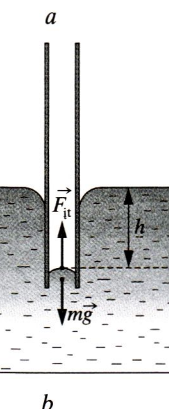
$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}. \qquad (129)$$

Pastarąją lygtį galima išvesti remiantis ir kitais samprotavimais. Iš 96 paveikslo matyti, kad kapiliariniame vamzdelyje esantį skystį veikia sunkio ir įtempimo jėgos, kurios yra vienodo didumo, bet nukreiptos priešingomis kryptimis, kai skystis kapiliare nustoja judėjęs. Šią mintį užrašome taip: $mg = F_{\text{įt}}$. Jau žinome, kad kūno masę galime išreikšti formule $m = \rho V$. Kadangi $V = \pi r^2 h$, tai $m = \rho\,\pi r^2 h$. Prisiminę 128 lygtį ir matematiškai pertvarkę reiškinius, gauname lygtį, analogišką 129 lygčiai.

Skysčio pakilimo (ar nusileidimo) aukštis priklauso nuo skysčio prigimties (ρ, σ) ir nuo kapiliaro spindulio *r* (kuo jis mažesnis, tuo daugiau skystis pakyla ar nusileidžia). Didėjant temperatūrai, mažėja skysčio paviršiaus įtempimas σ, ir skysčio aukštis kapiliaruose mažėja.



a



b

96 pav.

Kapiliariniai reiškiniai yra labai svarbūs gamtoje bei technikoje. Gyvūnų ir augalų kapiliarais cirkuliuoja kraujas ir maistingosios medžiagos. Kapiliarų gausu dirvoje. Kuo tankesnė dirva, tuo siauresni kapiliarai. Ariant ar akėjant sudaromi kapiliarai, ir taip pašalinama iš dirvos drėgmė, o voluojant pasėlius, suardomi kapiliarai, ir taip dirvoje sulaikoma drėgmė.

Klausimai ir užduotys

1. Kokio skysčio galima pripilti į stiklinę aukščiau kraštų? Kodėl?

2. Sausros metu žemės paviršiuje susidaro kieta pluta. Ar reikia ją purenti?

3. Ligoniui paskirti lašai bus lašinami prikūrentoje patalpoje. Ar lašų skaičių reikės padidinti, ar sumažinti? Kodėl?

4. Plonas aliuminio žiedas, kurio spindulys 7,8 cm ir masė 7 g, liečia muilo tirpalą. Kokios reikia jėgos žiedui atitraukti nuo tirpalo, kuris yra kambario temperatūros?

5. Kokia energija išsilaisvina smulkiems 2 $\cdot 10^{-3}$ mm spindulio vandens lašeliams susiliejant į vieną 2 mm spindulio lašą?

6. Koks slėgis veikia orą 5 $\cdot 10^{-3}$ mm spindulio burbuliuke, esančiame po vandens paviršiumi?

7. Koks turi būti kapiliarinio vamzdelio spindulys, kad visiškai drėkinantis vanduo pakiltų kapiliaru 10 cm? Vandens paviršiaus įtempimo koeficientas lygus 7 $\cdot$ 10^{-2} N/m.

51. Kristaliniai ir amorfiniai kūnai. Kūnų lydymasis

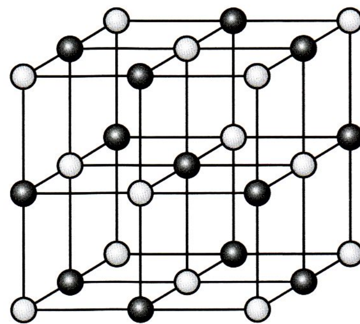
Visi kietieji kūnai skirstomi į dvi grupes: kristaliniùs ir amòrfinius kū́nus. Būdingiausias kristalinių kūnų išorinis požymis – taisyklinga geometrinė forma, kuri kartais pastebima paprasta akimi, o kartais – žiūrint pro mikroskopą. Pavyzdžiui, valgomosios druskos (NaCl) kristalai yra kubo formos, o kvarco (SiO_2) kristalai – šešiasienių prizmių, kurių galai baigiasi šešiasienėmis piramidėmis, formos. Pavieniai dideli kristalai vadinami *monokristãlais*.

Daugelis kietųjų kūnų yra vadinamosios **polikristalìnės sandaros, t. y. jie sudaryti iš daugybės mažų kristaliukų, kurie orientuoti netvarkingai**. Tokie yra, pavyzdžiui, metalai. Kristaliniai kūnai pasižymi **anizotròpija, t. y. jų fizinės savybės įvairiomis kryptimis persiduoda skirtingai**, pavyzdžiui, jie įvairiomis kryptimis nevienodai praleidžia šilumą, elektrą, šviesą, skirtingai plečiasi ir kt. Polikristaliniai kūnai dėl netvarkingos atskirų kristalėlių orientacijos nepasižymi anizotropija, tačiau juos sudarantieji atskiri kristalėliai yra anizotropiniai.

Taisyklingą kristalinių kūnų formą sąlygoja tvarkingai periodiškai išsidėsčiusios medžiagos dalelės – jonai, atomai bei molekulės. Šios dalelės, veikiamos traukos bei stūmimo jėgų, sudaro vadinamąją erdvinę (kristalinę) gardelę. **Erdvinėje gardelėje dalelės tik svyruoja apie pusiausvyros padėtį ir dėl stiprių sąveikos jėgų negali chaotiškai judėti po visą kūno tūrį.**

Pagal tai, iš kokių dalelių sudarytos kristalų erdvinės gardelės ir koks yra ryšys tarp šių dalelių, kristalai skirstomi į *jòninius, kovalentiniùs, metãliškuosius ir molekuliniùs*.

Daugelis druskų yra joniniai kristalai, t. y. jie sudaryti iš teigiamųjų ir neigiamųjų jonų, tarp kurių veikia elektrostatinės jėgos. Būdingas šios rūšies pavyzdys yra NaCl kristalas. Besijungdami į kristalą, natrio atomai „paskolina“ savo išorinio sluoksnio elektronus (kurių turi po vieną) chloro atomams, ir taip susidaro Na^+ ir Cl^- jonai, kurie, veikiami elektrostatinių jėgų, išsidėsto taisyklingai pakaitomis. 97 paveiksle parodyta NaCl kristalo erdvinė gardelė (Na^+ jonai – balti rutulėliai; Cl^- – juodi).



97 pav.

Joniniai kristalai pasižymi palyginti dideliu mechaniniu atsparumu, aukšta skystėjimo temperatūra. Jų elektrinis laidumas, esant įprastinėms temperatūroms, nežymus.

Kovalentiniai kristalai yra labai kietos, elektrai nelaidžios medžiagos. Šių kristalų gardelių mazguose yra neutralūs atomai. Būdingas kovalentinių kristalų pavyzdys yra deimantas ($_6C$).

Metališkųjų kristalų gardelės mazguose yra teigiamieji metalų jonai, o tarp jų, panašiai kaip dujų molekulėse, juda laisvieji elektronai. Išorinio sluoksnio valentiniai elektronai metaluose yra palyginti silpnai susiję su atomų branduoliais ir todėl, susidarant skysčiui ar kietajam kūnui, atomai išsidėsto vienas kito atžvilgiu taip arti, kad susidaro sąlygos išsilaisvinti elektronams. Gardelėje ryšys susidaro sąveikaujant jonams ir laisviesiems elektronams. Tarp jonų esantys elektronai „stengiasi“ jonus suartinti – pritraukti vieną prie kito, tuo būdu atsverdami teigiamųjų krūvių tarpusavio stūmimo jėgas. Taigi elektronai lyg „cementas“ suriša teigiamuosius jonus, priešingu atveju stūmimo jėgos suardytų gardelę. Savo ruožtu jonai laiko elektronus gardelėje, „neleisdami“ jiems išeiti už jos ribų.

Metalai yra labai atsparūs mechaniniams poveikiams, geri elektros ir šilumos laidininkai.

Molekulinių kristalų gardelės mazguose yra tam tikra kryptimi orientuotos neutralios molekulės arba atomai. Tarp jų yra silpnas elektrostatinės prigimties ryšys. Atomai bei molekulės yra neutralūs, bet labai dažnai jų elektronai branduolio atžvilgiu būna pasiskirstę nesimetriškai. Toks atomas ar molekulė yra *pòliniai*, t. y. jų teigiamojo ir neigiamojo krūvių „svorio“ centrai nesutampa, taigi molekulė prilygsta *elektrìniam dipòliui*. Esant gardelės mazguose polinėms molekulėms, tarp jų teigiamų ir neigiamų sričių atsiranda silpnos traukos jėgos, todėl šio tipo kristalai nepasižymi mechaniniu atsparumu ir lydosi žemoje temperatūroje. Taip kristalizuojasi vanduo (H_2O) ir suskystintos dujos (H_2, N_2, CO_2 ir kt.).

Be kristalinių kūnų, gamtoje yra ir kietų amorfinių kūnų. **Amorfiniuose kūnuose dalelės išsidėsčiusios netvarkingai, todėl jie neturi taisyklingos geometrinės formos ir yra izotròpiniai.** Savo savybėmis amorfiniai kūnai daugiau panašūs į didelio klampumo skysčius. Tokių kūnų pavyzdžiai – gintaras, įvairios dervos, stiklas ir kt.

Priklausomai nuo sąlygų ta pati medžiaga gali kristalizuotis įvairiai. Pavyzdžiui, galimos anglies būsenos yra: deimantas ir grafitas – kristaliniai kūnai, turintieji skirtingas gardeles, o suodžiai – amorfinė medžiaga.

Šildant kristalinius kūnus, didėja dalelių greičiai, o kartu ir atstumai tarp jų. Pasiekus tam tikrą temperatūrą, kristalinė gardelė pradeda irti – kūnas lydosi. Kol kūnas lydosi, jo temperatūra nekinta ir yra lygi lydymosi temperatūrai. Lydymosi metu kūnui suteikiama šiluma sunaudojama kristalinėms gardelėms suardyti.

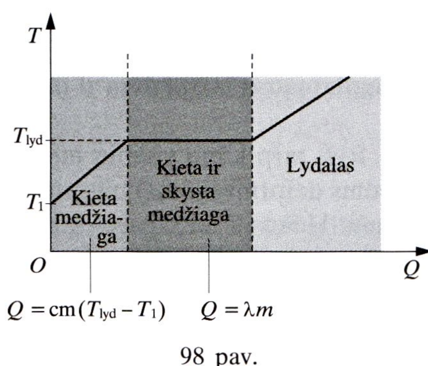
Kai $T = T_{lyd}$, kūnui išlydyti reikalingas šilumos kiekis, proporcingas jo masei:

$$Q_{lyd} = \lambda m. \quad (130)$$

Dydis λ vadinamas **savitąja skystėjimo (lýdymosi) šilumà, kurios skaitinė vertė lygi šilumos kiekiui, reikalingam 1 kg masės kūnui suskystinti lydymosi temperatūroje**. Ji priklauso nuo medžiagos prigimties ir išorinių sąlygų. Slėgiui didėjant, daugelio kūnų lydymosi temperatūra didėja. Tokių medžiagų λ taip pat didėja, tačiau kai kurių – ledo, bismuto, galio – mažėja. Suskystėjusį kūną toliau šildant, jo temperatūra vėl ima didėti. Nustojus šildyti, suskystėjęs kūnas ima aušti, kol prasideda kristalizacijos (kietėjimo) procesas.

Amorfiniuose kūnuose tik artimiausieji atomai išsidėstę tvarkingai, bet to paties elemento struktūra visomis kryptimis tiksliai nesikartoja. Visi amorfiniai kūnai yra izotropiški. Tipiškas amorfinių medžiagų pavyzdys yra stiklas. Kai kurios medžiagos (pavyzdžiui, siera, kvarcas) gali būti ir kristalinės, ir amorfinės būsenos.

Šildomi amorfiniai kūnai laipsniškai minkštėja ir suskystėja (98 pav.). Ribos tarp kietosios ir skystosios fazės nėra – visa amorfinio kūno masė vienoda.



98 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Ar visi kristaliniai kūnai yra anizotropiniai?

2. Kuo skiriasi amorfiniai kūnai nuo kristalinių? Atsakymą pateikite molekulinės kinetinės teorijos požiūriu ir jo teisingumą iliustruokite šių kūnų pavyzdžiais.

3. Pateikite amorfinių kūnų pavyzdžių.

4. Ar gali 350 °C ir 400 °C temperatūros vanduo būti skystas? Kodėl?

5. Anglies dioksido kritinė temperatūra 304 K. Ar galima esant 300 K ir 310 K temperatūrai šias dujas paversti skysčiu? Kodėl?

6. Kokios būsenos yra eteris, kai jo temperatūra lygi kritinei (467 K) temperatūrai?

7. Ar galima vandenyje išlydyti šviną? Kokiomis sąlygomis?

8. Iš monokristalo išpjautas kubas pakaitinus gali pasidaryti gretasienio formos. Paaiškinkite, kodėl.

9. Kodėl, smarkiai kintant oro temperatūrai, akmuo sutrūkinėja, o metalas – ne? Atsakymą pagrįskite.

10. Koks yra lydymo krosnies naudingumo koeficientas, jeigu joje išlydoma 300 kg vario, sudeginus 32 kg A–I markės anglies? Pradinė vario temperatūra 23 °C.

52. Mechaninės kietųjų kūnų savybės

Kiekvienas kūnas, veikiamas išorinių jėgų, keičia savo formą, t. y. deformúojasi. Kūnui deformuojantis, pakinta atstumai tarp jį sudarančių dalelių. Šiam nuotolio pakitimui priešinasi dalelių sąveikos jėgos, todėl deformuotame kūne atsiranda vidinės tamprumo jėgos, kurias atsveria kūną veikiančios išorinės jėgos. Kitaip tariant, **deformuotame kūne atsiranda vidinis mechaninis įtempimas, kurio skaitinė vertė yra lygi išorinei jėgai $\vec{F}$, veikiančiai deformuojamo kūno skerspjūvio ploto vienetą**:

$$\sigma = \frac{F}{S}; \tag{131}$$

čia S – skerspjūvio plotas, statmenas veikiančiai jėgai; F – kūną deformuojanti jėga.

Veikiant išorinei jėgai (kūną deformuojant), pakinta kūno matmenys. Šiems pakitimams apibūdinti įvedame *santykìnės* kūno *defomãcijos* terminą. **Santykinė kūno deformacija (ε) parodo, kokia dalimi padidėja ar sumažėja kūno matmenys.** Jei kūno pradinius matmenis bei formą apibūdina dydis x_0, kuris, veikiant išorinei jėgai, pakinta dydžiu Δx, tai santykinė deformacija

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_0}. \tag{132}$$

Ryšį tarp kūno vidinio mechaninio įtempimo ir santykinės deformacijos (esant mažoms deformacijoms) nustatė R. Hukas (Hooke; 1675 m.), ir ši priklausomybė vadinama Huko dėsniu, pagal kurį **vidinis mechaninis įtempimas σ yra tiesiogiai proporcingas santykinei deformacijai ε**, t. y.

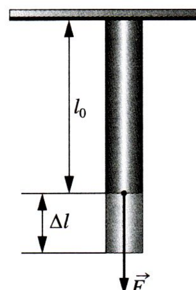
$$\sigma = E|\varepsilon|. \tag{133}$$

Proporcingumo koeficientas E vadinamas *tamprùmo mòduliu* arba *Jùngo mòduliu*. Jis nustatomas pagal 133 formulę matuojant įtempimą σ bei santykinę deformaciją ε (esant mažoms deformacijoms). Atlikti eksperimentai patvirtina, kad bet kurios formos ir matmenų kūnų, pagamintų iš tos pačios medžiagos, tamprumo modulis yra vienodas: $E = \frac{\sigma}{|\varepsilon|}$.

Huko dėsnis galioja visų rūšių deformacijoms: *tempìmo* bei *gniùždymo, lenkìmo, šlytiẽs* ir *sukìmo*, todėl (133) formulėje vartojamas santykinės deformacijos ε modulis.

1. Tempimo (gniuždymo) deformacija. Jungo modulis

Tempkime jėga $\vec{F}$ vienalytės medžiagos, pavyzdžiui, plieno, vielą, kurios ilgis l_0 ir skerspjūvio plotas S (99 pav.). Veikiama šios jėgos, viela pailgės dydžiu Δl ir, remiantis 132 formule, jos santykinė deformacija $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$. Vieloje atsiradęs vidinis įtempimas pagal 131 formulę lygus $\sigma = \frac{F}{S}$. Taikant tempimo deformacijai Huko dėsnio formulę (133), gauname $\frac{F}{S} = E\frac{|\Delta l|}{l_0}$; o iš čia absoliutinis pailgėjimas



99 pav.

$\Delta l = \dfrac{Fl_0}{ES}$. Matome, kad *vielos pailgėjimas yra tiesiogiai proporcingas deformuojančiai jėgai, vielos ilgiui ir atvirkščiai proporcingas jos skerspjūvio plotui.*

Apibūdinkime Jungo modulio fizikinę prasmę. Tarkime, kad $\Delta l = l_0$ (viela pailgėja dvigubai), tuomet Jungo modulis $E = \dfrac{F}{S} = \sigma$, t. y. **Jungo modulis skaitine verte lygus tokiam vidiniam įtempimui, kuris atsiranda kūne, pailgėjusiame du kartus.** Įvairių medžiagų Jungo modulis yra skirtingas, jo didumas priklauso nuo medžiagos tamprumo savybių: pavyzdžiui, plieno $E = 20 \cdot 10^{10}$ Pa, aliuminio $E = 7 \cdot 10^{10}$ Pa. Kuo didesnis Jungo modulis, tuo mažiau deformuojasi strypas, kai kitos sąlygos yra vienodos (vienodi F, S, l_0). **Jungo modulis apibūdina medžiagos pasipriešinimą tampriajai tempimo (arba gniuždymo) deformacijai.**

Dabar išreikškime tamprumo jėgą: $F = \dfrac{SE}{l_0}|\Delta l|$. Pažymėkime $\dfrac{SE}{l_0}$ raide k, ir tamprumo jėgą galėsime užrašyti šitaip: $F = k\,|\Delta l|$. Tokią pačią formulę jau buvome gavę §16 (38).

Vadinasi, vielos (ar strypo) standumas (tamprumas) *k* tiesiogiai proporcingas Jungo modulio bei vielos skerspjūvio ploto sandaugai ir atvirkščiai proporcingas jos ilgiui.

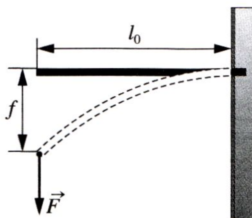
2. Lenkimo deformacija

Vienu galu į sieną įtvirtintą l_0 ilgio strypo laisvąjį galą veikime jėga $\vec{F}$ (100 pav.). Strypas deformuosis – išsilenks.

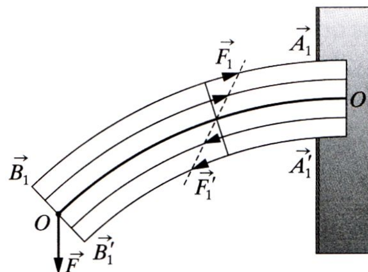
Deformacijos dydį apibūdina įlinkis f, kuris priklauso nuo veikiančios jėgos, strypo matmenų ir tamprumo modulio.

Lenkimo deformacija yra atskiras tempimo ir gniuždymo deformacijų atvejis. Lenkiant viršutiniai strypo sluoksniai yra tempiami, o apatiniai – gniuždomi (101 pav.). Viršutinis strypo sluoksnis AB yra daugiausia ištemptas, o apatinis A_1B_1 – daugiausia sugniuždytas. Einant nuo šių sluoksnių gilyn į strypo vidų, kiekvienas sluoksnis bus vis mažiau tempiamas bei gniuždomas. Strypo viduje egzistuoja visai nedeformuotas sluoksnis, kuris vadinamas *neutraliúoju slúoksniu.*

Išlenkto strypo vidinės tamprumo jėgos $\vec{F}_1$ ir $\vec{F}_1'$ stengiasi išlenkti strypą į pradinę padėtį, t. y. jos priešinasi deformuojančios jėgos $\vec{F}$ veikimui. Didžiausią pasipriešini-



100 pav.



101 pav.

mą išvysto labiausiai deformuotų sluoksnių vidinės tamprumo jėgos. Neutralusis sluoksnis yra visai nedeformuotas, todėl jis nesudaro jokio pasipriešinimo deformuojančių jėgų veikimui, t. y. jis neturi įtakos medžiagos atsparumui. Dėl šios priežasties technikoje įvairios konstrukcijos, kurias veikia lenkimo deformacijos, dažnai daromos tuščiavidurės, t. y. vamzdžių pavidalo. Taip sutaupoma daug metalo, detalės esti lengvos, o jų atsparumas lenkimui nežymiai sumažėja. Pavyzdžiui, dviračio rėmai yra pagaminti iš plonesnių vamzdžių.

Pastebėta, kad ir gamtoje daugelio augalų stiebeliai bei gyvūnų kaulai taip pat yra tuščiaviduriai. Varpinių augalų stiebeliai, pučiant vėjui, yra lenkiami. Jei jie nebūtų tuščiaviduriai, tai atsparumas lenkimui būtų mažesnis, nes pilnavidurį stiebelį, be išorinės jėgos, veiktų dar ir jo paties svoris, kuris visada būtų didesnis už tuščiavidurio stiebelio svorį. Stiebelis būtų mažiau lankstus ir greičiau nulūžtų.

3. Šlyties deformacija

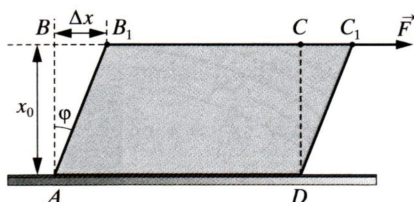
Jei gretasienį $ABCD$ (102 pav.), kurio pagrindas AD įtvirtintas, veiksime paviršiaus liestinės jėga $\vec{F}$, tai jis deformuosis ir įgaus formą AB_1C_1D. Jėgos veikiami kūno sluoksniai vienas kito atžvilgiu pasislenka: daugiausia, dydžiu Δx, pasislenka viršutinis sluoksnis, o apatinis lieka vietoje. Šios rūšies deformaciją vadiname *šlytimì*. Taip deformuoto kūno vidinį tangentinį įtempimą τ randame, dalydami jėgą F iš kūno viršutinio paviršiaus BC ploto S, t. y. $\tau = \frac{F}{S}$. Santykinė deformacija $\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_0}$. Pagal Huko dėsnį $\tau = G\frac{\Delta x}{x}$; čia G – šlyties modulis, priklausantis nuo medžiagos atsparumo šlyties deformacijai, o $\frac{\Delta x}{x_0} = \operatorname{tg}\varphi$. Kadangi Huko dėsnis galioja tik mažoms deformacijoms, tai kampas turi būti nedidelis. Todėl $\frac{\Delta x}{x_0} = \operatorname{tg}\varphi \approx \varphi$. Įrašę τ ir $\frac{\Delta x}{x_0}$ reikšmes į Huko dėsnio išraišką, gauname:

$$\frac{F}{S} = G\varphi. \tag{134}$$

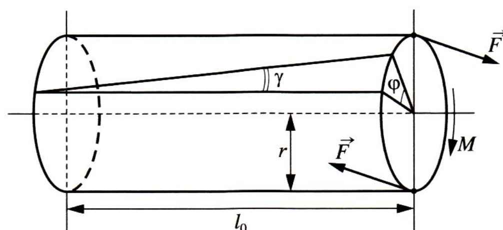
Jeigu φ = 1 rad, tai $G = \frac{F}{S}$, t. y. **šlyties modulis skaitine verte yra lygus vidiniam tangentiniam įtempimui, kai šlyties kampas lygus 1 rad** ($\approx 57°17'44{,}8''$).

4. Sukimo deformacija

Jei vieną apskrito strypo galą įtvirtinsime nejudamai (103 pav.), o antrą suksime jėgų dvejetu $\overline{FF}$, tai skersiniai strypo sluoksniai pasislinks vieni kitų atžvilgiu. Taigi



102 pav.

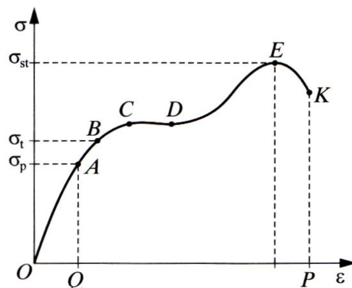


103 pav.

sukimas yra atskiras šlyties deformacijos atvejis. Deformacijos dydį apibūdina *sukìmo kam̃pas* φ, kuris yra tiesiogiai proporcingas jėgų dvejeto $\overrightarrow{FF}$ sukimo momentui $\vec{M}$: $\varphi = k\vec{M}$; čia k – proporcingumo koeficientas, priklausantis nuo strypo ilgio l_0, spindulio r ir jo medžiagos šlyties modulio G. Teoriškai įrodoma, kad $k = \frac{2l_0}{\pi r^4 G}$. Taigi užsukimo kampas sukimo deformacijos atveju yra $\varphi = \frac{2l_0}{\pi r^4 G} M$.

5. Tamprumo ir atsparumo ribos

Kaip jau buvo minėta, Huko dėsnis galioja, kol deformacijos yra mažos ir įtempimai neviršija tam tikrų ribų. Mažiausias vidinis įtempimas, kuriam esant jau nelieka tiesinio proporcingumo tarp įtempimo ir deformacijos, vadinamas *proporcingùmo ribà* σ_p (104 pav.). Jei ši riba nėra peržengta, tai, nustojus veikti deformuojančiai jėgai, kūno vidinės tamprumo jėgos grąžina jo pradinę formą.



104 pav.

Jei įtempimas yra truputį didesnis už proporcingumo ribą (vyks netiesinė deformacija), kūnas atstato pradinę formą tik po tam tikro laiko (diagramos dalis AB). Didžiausias deformuoto kūno vidinis įtempimas, kuris, nustojus veikti deformuojančiai jėgai, atstato kūno pradinę formą praėjus tam tikram laikui, vadinamas *tamprùmo ribà* σ_t (santykinė liekamoji deformacija neviršija 0,1%). Tamprumo riba už proporcingumo ribą yra didesnė tik šimtosiomis procento dalimis.

Jei kūno viduje, veikiant išorinei jėgai, susidarys didesni įtempimai negu tamprumo riba, tai medžiaga pasidarys iš dalies tampri, iš dalies plastiška – vidinės tamprumo jėgos nepajėgs priešintis išorinės jėgos veikimui, ir deformacija smarkiai didės. Šioje srityje, nustojus veikti deformuojančiai jėgai, kad ir kiek belauktume, kūnas nebeatstato pradinės formos, gaunama *liekamóji defor̃mãcija*.

Didinant išorinę jėgą (apkrovą), deformacija didėja vis greičiau ir greičiau. Kai įtempimas atitinka diagramos tašką C, kūnas praktiškai ilgėja jau nedidinant apkrovos. Šis reiškinys vadinamas *mẽdžiagos takumù* (dalis CD). Diagramos kreivė šiuo atveju beveik horizontali.

Toliau, didėjant deformacijai, įtempimo kreivė pradeda kilti, kol pasiekia tašką E. Po to įtempimas greitai sumažėja, ir kūnas suyra (taškas K). Taigi tempiamas kūnas nutrūksta tada, kai įtempimas pasiekia didžiausią vertę σ_{st} (stiprumo riba) – didžiausią mechaninį įtempimą, kurį medžiaga dar gali atlaikyti. *Stiprumù* vadinama kūno savybė nesuirti nuo išorinių poveikių.

Stiprùmo atsargà vadinamas skaičius, rodantis, kiek kartų stiprumo riba yra didesnė už leidžiamą įtempimą. Jis būna nuo 1,7 iki 10. Kuo medžiaga stipresnė, tuo ji kietesnė, ir atvirkščiai. Kiečiausia medžiaga yra deimantas.

Kūno savybė atgauti savo formą ir tūrį nustojus veikti išorinėms jėgoms vadinama tamprumù. Ši savybė kūnui būdinga tol, kol deformacijos mažos, t. y. kol neperžengiama tamprumo riba. Viršijus ją, kūnas jau nebeatgauna buvusios formos ar tūrio nustojus veikti išorinėms jėgoms. **Kūno savybė likti deformuotam vadinama plastiškumù.**

Kūnų skirstymas į tamprius ir plastiškus yra sąlyginis. Pavyzdžiui, plienas ir guma yra tamprūs, o varis ir vaškas – plastiški. Nelabai ištempta varinė spyruoklė atleista susitraukia, o labai ištempta plieninė spyruoklė – ne. Šaltą plieną ar geležį kalti sunku, o iš įkaitintų galima nukalti bet kokios formos daiktus.

Yra medžiagų (stiklas, plytos), kurioms nebūdinga liekamoji deformacija. Kai viršijama tamprumo riba, jos subyra. Ši medžiagų savybė vadinama *trapumù*. Tokios medžiagos jautrios smūgiams, pavyzdžiui, stikliniai ir porcelianiniai dirbiniai, krisdami iš nedidelio aukščio, sutrupa į gabalus. Ketus, marmuras, gintaras taip pat yra labai trapūs, o plienas, varis, švinas netrapūs.

Visų trapių medžiagų įtempimas, didėjant jų deformacijai, labai greitai didėja. Jos suyra net ir mažai deformuotos. Pavyzdžiui, kai santykinis pailgėjimas $\varepsilon = 0{,}45\%$, ketus suyra, o plienas lieka tamprus. Jis suyra, kai $\varepsilon = 15\%$.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname kūno deformacija?

2. Kokias žinote kietojo kūno deformacijas?

3. Pasakykite Huko dėsnį tampriosioms deformacijoms.

4. Ką vadiname kūno atsparumo riba?

5. Kokia yra Jungo modulio fizikinė prasmė?

6. Ką vadiname įtempimu?

7. Kokiais SI vienetais matuojamas Jungo modulis ir įtempimas?

8. Kodėl rėžtuvai negaminami iš stiklo, nors jų kietumas yra toks pats, kaip įrankinio plieno?

9. Žalvarinė 0,4 mm skersmens ir 18 m ilgio viela tempiama 24 N jėga. Žalvario Jungo modulis $9 \cdot 10^{10}$ Pa. Raskite vielos skerspjūvio plotą, įtempimą ir absoliutųjį bei santykinį pailgėjimą.

10. Kokio skersmens turi būti keliamojo krano kablio strypas, kad, keliant 25 kN krovinį, įtempimas nebūtų didesnis kaip $6 \cdot 10^{7}$ Pa? (v = const)?

11. Kokia mažiausia apkrova turi veikti 4 m ilgio ir 2 mm² skerspjūvio ploto žalvarinę vielą, kad atsirastų liekamoji deformacija? Koks tada bus vielos santykinis pailgėjimas? Žalvario tamprumo riba $1{,}1 \cdot 10^{8}$ Pa. Vielos masės nepaisoma.

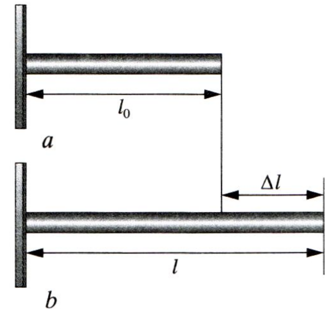
12. Varinis 1 m ilgio strypas tolygiai sukasi apie vertikalią ašį, einančią per jo galą. Kokiu kampiniu greičiu sukdamasis strypas nutrūks?

53. Šiluminis medžiagų plėtimasis

Pakaitinto kūno atomai (molekulės) juda intensyviau. Jie stumdo vienas kitą ir užima daugiau vietos, o šaldomi šių kūnų atomai tarsi artėja vienas prie kito, užimdami mažiau vietos. Sakome, kad kaitinami kietieji kūnai plečiasi, o šaldomi – traukiasi.

Tad pagrindinis uždavinys – susipažinti su šių reiškinių kiekybiniais dėsniais.

Kietasis kūnas turi tam tikrą formą, vadinasi, ir tam tikrus linijinius matmenis (rutulys turi tam tikrą skersmenį, stačiakampis tašelis – tam tikrą ilgį, plotį, aukštį ir t. t.).



105 pav.

Kūnų linijinių matmenų didėjimas šildant vadinamas linijiniù plėtìmusi. Jį paprasčiausia tirti nagrinėjant, kaip strypo, pagaminto iš mus dominančios medžiagos, ilgis priklauso nuo temperatūros.

Tarkime, jog turime žinomos medžiagos (pvz., varinį) strypą, kurio ilgį 0 °C temperatūroje pažymėsime l_0 (105 pav., *a*). Pastarąjį pašildome iki temperatūros *t* ir išmatuojame jo ilgį *l* (105 pav., *b*). Nesunku apskaičiuoti strypo absoliutųjį ir santykinį pailgėjimą (deformaciją) $\Delta l = l - l_0$, ir $\varepsilon = \left|\frac{\Delta l}{l_0}\right|$. Santykiniu pailgėjimu vadiname absoliučiojo pailgėjimo santykį su strypo pradiniu ilgiu. Atliekant eksperimentus, pastebėta, kad santykinis pailgėjimas ε yra proporcingas temperatūros pokyčiui: $\frac{\Delta l}{l_0} \sim \Delta t$. Todėl rašant lygybę, įvedamas proporcingumo koeficientas α: $\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta t$. Kadangi $\Delta l = l - l_0$, tai minėtos lygtys pertvarkomos taip:

$$l = l_0(1 + \alpha\,\Delta t). \qquad (135)$$

Šioje lygtyje l – strypo ilgis pakitus temperatūrai Δt laipsnių; l_0 – strypo ilgis 0 °C temperatūroje; α – linijinio plėtimosi koeficientas; Δt – temperatūros pokytis.

Iš 135 lygties išplaukia, kad linijinio plėtimosi koeficientas $\alpha = \frac{l - l_0}{l_0 \Delta t}$.

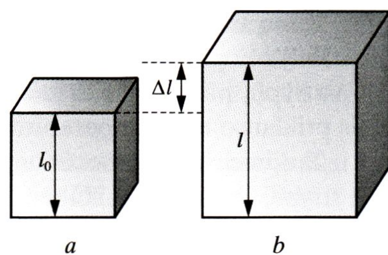
Linijinio plėtimosi koeficientas skaitine verte lygus strypo, kurio ilgis esant 0 °C temperatūrai buvo lygus ilgio vienetui, pailgėjimui, pakitus temperatūrai vienu laipsniu.

Šio dydžio dimensija, kaip matome iš formulės, yra: $[\alpha] = \frac{1}{°C} = °C^{-1}$.

Įvairių medžiagų linijinio plėtimosi koeficientai yra skirtingi, o jų reikšmės pateikiamos lentelėse. Pavyzdžiui:

Medžiaga	α (1/°C)	β(1/°C)
Geležis, plienas	0,000012	
Varis	0,000017	
Stiklas	0,000008	
Platina	0,000009	
Kvarcas	0,0000004	
Aliuminis, duralis	0,000023	
Gyvsidabris		0,00018
Spiritas		0,0011
Žibalas		0,0010

Pažymėję V_0 kokio nors kūno tūrį esant 0 °C temperatūrai, o V – jo tūrį, pakitus temperatūrai Δt laipsnių (106 pav.) ir pritaikę linijinio plėtimosi analogą, gauname, kad dydžio $\beta = \frac{V - V_0}{V_0 \Delta t}$ skaitinis didumas yra lygus kūno tūrio padidėjimui, pašildžius jį vienu laipsniu, jei, esant 0 °C temperatūrai, to kūno tūris lygus vienetui. Šis dydis vadinamas kūno *tū̃rio plėtìmosi koeficientù* ir matuojamas $|\beta| = 1/°C$.



106 pav.

Iš tūrio plėtimosi koeficiento išraiškos gauname:

$$V = V_0(1 + \beta \Delta t). \quad (136)$$

Tarp tūrio ir linijinio plėtimosi koeficientų yra ryšys, kurį nustatysime samprotaudami taip: tarkime, kad esant 0 °C temperatūrai, turime kubą, kurio kiekviena briauna lygi ilgio vienetui. Pašildžius kubą vienu laipsniu, jo briauna pailgės dydžiu, kurio skaitinis didumas yra lygus linijinio plėtimosi koeficientui (106 pav.), o tūris padidės tokiu dydžiu, kurio skaitinis didumas yra lygus tūrio plėtimosi koeficientui.

Kadangi kubo tūris lygus briaunos kubui, tai $1 + \beta = (1 + \alpha)^3$.

Iš čia gauname: $1 + \beta = 1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3$ arba $\beta = 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3$. Kadangi $3\alpha^2$ ir α^3 yra be galo maži dydžiai, palyginus su 3α, tai $3\alpha^2$ ir α^3 galime atmesti, nepadarydami didelės klaidos. Vadinasi, $\beta \approx 3\alpha$. **Kietojo kūno tūrio plėtimosi koeficientas lygus trigubam linijinio plėtimosi koeficientui**. Tai yra teisinga tik tiems kūnams, kurie į visas puses plečiasi vienodai. Tačiau šia savybe pasižymi ne visi kūnai.

Skysčiai linijinio plėtimosi koeficiento neturi, nes skystis neturi apibrėžtos formos ir apibrėžtų linijinių matmenų. Tačiau skysčio tūrio plėtimosi koeficientas turi prasmę.

Kintant kūno temperatūrai, kinta ir jo tankis. Jeigu kūno masė yra m, o temperatūra 0 °C, tai $\rho_0 = \frac{m}{V_0}$; temperatūrai pakitus Δt laipsnių, $\rho = \frac{m}{V}$. Kadangi $V = V_0(1 + \beta \Delta t)$, tai $\rho = \frac{m}{V_0(1 + \beta \Delta t)}$; čia ρ_0 – kūno tankis 0 °C temperatūroje, ρ – kūno tankis, pakitus temperatūrai Δt laipsnių, V_0 – kūno tūris 0 °C temperatūroje, β – tūrio plėtimosi koeficientas, Δt – temperatūros pokytis.

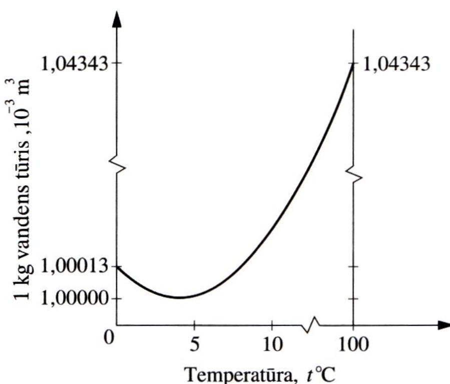
Iš čia išplaukia, kad kūno tankio priklausomybė nuo temperatūros yra išreiškiama lygtimi

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta \Delta t}. \quad (137)$$

Skirtingai negu daugelio skysčių, vandens šiluminis plėtimasis turi kai kurių ypatumų.

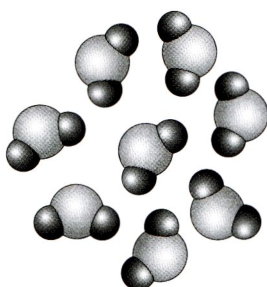
Rudenį atšalus orams, vanduo irgi atvėsta. Kaip ir kiti skysčiai, vėsdamas jis truputį traukiasi – pasidaro tankesnis (107 pav.), todėl paviršiaus sluoksnyje atšalęs vanduo leidžiasi gilyn, o į jo vietą kyla iš apačios lengvesnis, aukštesnės temperatūros vanduo. Toks maišymasis vyksta tol, kol visa vandens masė atšąla iki 4 °C (štai kodėl gilūs vandens telkiniai užšąla daug vėliau negu seklūs ežerai). Toliau šaldamas vanduo,

skirtingai negu kiti skysčiai, vėl ima plėstis. Maišymasis nutrūksta – atšalęs paviršinis lengvesnis vanduo nebesileidžia gilyn. Nukritus oro temperatūrai žemiau nulio, jis virsta ledu, kurio tankis dar mažesnis (paprastai būna atvirkščiai – užšaldamas skystis susitraukia). Taigi ledas žiemą padengia vandens baseinų paviršių, negrimzdamas į dugną, ir kartu su ledą užklojusiu sniegu apsaugo baseinus nuo iššalimo. Tokią vandens anomaliją, jam virstant ledu, sukelia tai, kad vandens molekulės virtimo į ledą metu ne glaudžiasi viena prie kitos, bet sudaro tarsi tuščiavidures tinklo akutes (108 pav.), todėl užimamas tūris padidėja apie 10%. O vandens molekulės pradeda jungtis į tokius akučių telkinius ne 0 °C, o maždaug +10 °C temperatūroje. Krintant temperatūrai nuo 10 °C iki 4 °C, vyksta dvejopi procesai – vanduo traukiasi dėl molekulių greičių mažėjimo ir kartu plečiasi dėl mikroledukų susidarymo. Jau 4 °C temperatūroje įsivyrauja pastarasis procesas, bet tik, esant 0 °C, sukaustomos visos vandens molekulės.

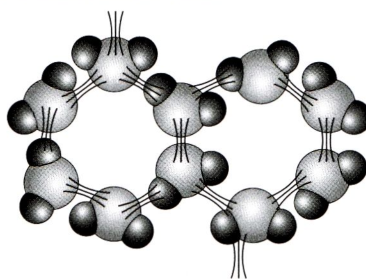


1 kg vandens tūrio priklausomybė nuo temperatūros

107 pav.



Vanduo



Ledas

Vandens molekulės vandenyje ir lede (didesnieji atomai – deguonies, mažesnieji – vandenilio)

108 pav.

Jei šios anomalijos nebūtų, suledėtų ne tik ežerai, bet ir jūros, negalėtų gyventi žuvys ir kiti vandens gyvūnai. Gyvoji gamta būtų daug skurdesnė, o gal ir visai nebūtų atsiradusi Žemėje – juk, anot šiuolaikinės evoliucijos teorijos, žemesniosios gyvybės formos išsivystė būtent vandenyje ir tik vėliau persikėlė į sausumą.

Kai kietasis arba skystasis kūnas šildomas išsiplečia ar vėsdamas susitraukia, jis gali įveikti dideles jėgas, trukdančias plėstis ar trauktis.

Tačiau neteisinga pažiūra, kad jokiomis išorinėmis jėgomis negalima sulaikyti kieto kūno šiluminio plėtimosi arba traukimosi. Pavyzdžiui, jeigu geležinis strypas yra įtvirtintas tarp dviejų nejudamų atramų, tai, pašildžius strypą 10 °C, jo spaudimas į atramas bus lygus maždaug 2000 N/cm^2. Jeigu atramos išlaikys tokį slėgimą, nepajudėdamos iš vietos, ir jeigu strypas neišlinks, tai šiluminį plėtimąsi atsvers išorinis slėgimas.

Didelės jėgos, atsirandančios šiluminio plėtimosi ar traukimosi metu, gali sugadinti ir net sugriauti įvairius įrenginius, jeigu iš anksto nesiimama atsargumo priemonių.

Į tai visada reikia atsižvelgti statant tiltus, geležinkelius ir t. t. Pavyzdžiui, geležinkelio tilto santvaros vieno galo negalima aklinai tvirtinti prie atramos: jis yra dedamas ant ritinių, kurie leidžia santvarai laisvai plėstis, nes kitu atveju vasarą pastatytas tiltas žiemą galėtų sugriūti. Geležinkelio bėgiai sandūroje nesuglaudžiami vienas su kitu dėl tos pačios priežasties.

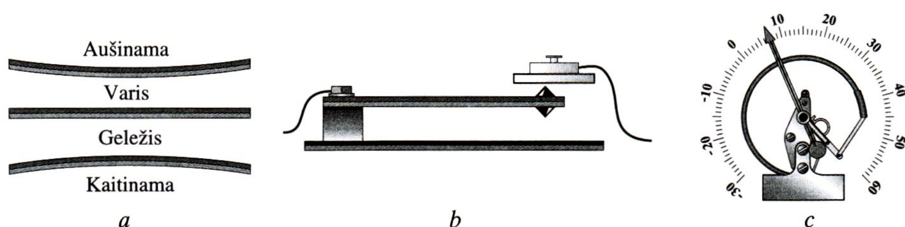
Negalima užmiršti apie šiluminį plėtimąsi, kai tenka metalą įlydyti į stiklą (pvz., vieleles, kuriomis srovė atiteka į elektros lemputę). Ne kiekvieną metalą galima įlydyti į stiklą, nes dėl skirtingų metalo ir stiklo šiluminio plėtimosi koeficientų atšąlant arba įšylant susidaro dideli įtempimai, dėl kurių trūkinėja stiklas. Geriausiai į stiklą tinka įlydyti platiną, nes jos plėtimosi koeficientas ($9 \cdot 10^{-6}$ 1/°C) yra labai artimas stiklo plėtimosi koeficientui ($8 \cdot 10^{-6}$ 1/°C). Yra ir specialių lydinių, tinkamų įlydyti į stiklą.

Gaminant tikslius matavimo prietaisus, dažnai reikia medžiagų su labai mažu plėtimosi koeficientu. Tokios medžiagos yra kvarcas ($\beta = 4 \cdot 10^{-7}$ 1/°C), plieno lydinys su nikeliu (maždaug 36% Ni), vadinamas *invarù* ($\beta = 1{,}5 \cdot 10^{-6}$ 1/°C), ir kt. Kvarcinį indą galima įkaitinti iki raudonumo, o paskui įmesti į labai šaltą vandenį. Tai nė kiek jam nepakenks, tuo tarpu kai indas iš paprasto stiklo dažnai trūksta net ir pilant į jį verdantį vandenį. Tai lengva paaiškinti: tos stiklo dalys, kurios susiliečia su verdančiu vandeniu, greitai išsiplečia, todėl atsiranda įtempimai tarp įkaitusių dalių ir dar nesuspėjusių įkaisti dalių. Stiklas dažnai būna nepakankamai atsparus, kad galėtų išlaikyti tokius įtempimus.

Iš invaro dažnai daromi laikrodžių svyruoklių strypeliai. Laikrodžių su tokiomis svyruoklėmis ėjimo tikslumas beveik nepriklauso nuo oro temperatūros.

Šiluminį plėtimąsi galima pritaikyti ir naudingai. Kaip pavyzdį galime imti bet kokį termometrą, kurio veikimas pagrįstas kūnų šiluminio plėtimosi reiškiniu. Šiluminis plėtimasis naudojamas gaminant termoreguliatorius, skirtus automatiškai palaikyti pastoviai temperatūrai kokioje nors patalpoje, pavyzdžiui, šaldytuve, kuriame laikomi maisto produktai, inkubatoriuje, laidynėje ir kt.

Svarbiausia įvairių termoreguliatorių detalė yra *bimetalìnė plokštẽlė*, sukniedyta iš dviejų skirtingai besiplečiančių metalų (109 pav., *a*). Kintant temperatūrai, ji riečiasi į vieną arba į kitą pusę, taip įjungdama ar atjungdama elektros grandinę (109 pav., *b*). Pavyzdžiui, šildytuve tokia plokštelė gali įjungti gaisro signalizatorių neleistinai pakilus temperatūrai. Bimetalinės plokštelės naudojamos įvairiausiuose automatikos prietaisuose. Pritvirtinus prie plokštelės rodyklę ir sugradavus temperatūros laipsniais, gaunamas metalinis termometras (109 pav., *c*), itin plačiai naudojamas aukštos temperatūros įrenginiuose.



109 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Ar sutriks jautrių svarstyklių pusiausvyra, jeigu vieną svirties petį įkaitinsime?

2. Šildomo iš monokristalo išpjauto kubo keičiasi ne tik tūris, bet ir forma. Kodėl?

3. 5 °C temperatūroje geležinės vielos ilgis 100,29 cm, iš cinko pagamintos vielos – 100,12 cm. Kokiai temperatūrai esant šių vielų ilgiai bus vienodi?

4. Geležies ruošiniui įkaitinti suvartota 1,68 MJ šilumos. Kiek pasikeitė ruošinio tūris?

5. 500 cm^3 spirito masė 0 °C temperatūroje lygi 400 g. Raskite jo tankį esant 15 °C temperatūrai.

6. Geležies tankis 0 °C temperatūroje lygus 7800 kg/m^3. Raskite jos tankį esant 500 °C temperatūrai. Ar didelis šis tankių skirtumas? Ar galima jo nepaisyti techniniuose skaičiavimuose?

7. Šildomo žalvarinio indo talpa padidėjo 0,6%. Kiek pakilo jo temperatūra?

9 SKYRIUS. TERMODINAMIKOS PAGRINDAI

Šiluminius reiškinius galima apibūdinti dydžiais (makroskopiniais parametrais), kuriuos parodo tokie prietaisai, kaip manometras ir termometras. Šie prietaisai nereaguoja į atskirų molekulių poveikį. **Šiluminių reiškinių teorija, kuri neatsižvelgia į kūnų molekulinę sandarą, vadinama termodinãmika** (gr. *thermos* – šiltas, karštas; *dynamikos* – jėgõs).

Pirmoji mokslinė šiluminių procesų teorija buvo ne molekulinė kinetinė teorija, o termodinamika. Ji atsirado nagrinėjant šilumos naudojimo optimalias sąlygas darbui atlikti. Tai įvyko XIX a. viduryje atradus energijos tvermės dėsnį, gerokai anksčiau, negu buvo pripažinta molekulinė kinetinė teorija.

Dabar moksle ir technikoje šiluminiams reiškiniams nagrinėti taikoma ir termodinamika, ir molekulinė kinetinė teorija. Teorinėje fizikoje molekulinė kinetinė teorija vadinama *statìstine mechãnika*, skirtingais metodais nagrinėjančia tuos pačius reiškinius. Šios teorijos papildo viena kitą.

Termodinamikos esmę sudaro du pagrindiniai dėsniai, arba principai (lot. *principium* – pradžia, pagrindas), apibūdinantys energiją. Šie dėsniai, kaip ir Niutono dėsniai, nėra įrodomi teoriškai, o gaunami apibendrinant eksperimentinius faktus ir tinka visoms medžiagoms, neatsižvelgiant į jų vidinę sandarą.

Statistinė mechanika – platesnis ir tikslesnis mokslas negu termodinamika, tačiau daug sudėtingesnis. Ja remiamasi tais atvejais, kai nepakanka paprastų termodinamikos sąryšių.

54. Vidinė energija

Kiekvieną kūną sudaro didžiulis kiekis molekulių, kurios dalyvauja netvarkingame šiluminiame judėjime ir nuolat sąveikauja viena su kita. Susitarta kūną sudarančių molekulių kinetinės ir jų tarpusavio sąveikos potencinės energijų sumą vadinti kūno *vidinè enèrgija*. Ši energija įeina į energijos virsmų gamtoje sistemą. Atradus vidinę energiją, buvo suformuluotas energijos tvermės ir virsmo dėsnis.

Sistemos vidinė energija U (p, V, T) susideda iš ją sudarančių dalelių (molekulių) šiluminio judėjimo kinetinės ir tų dalelių sąveikos potencinės energijų bei pačių molekulių vidinės energijos. Vidinės energijos pokytis ΔU rodo, kad pasikeičia sistemos termodinaminė būsena. Toks kitimas vadinamas *termodinãminiu procesù*.

Vidinei kūno energijai apskaičiuoti imamos paprasčiausiomis savybėmis pasižyminčios vienatomės dujos, kurias sudaro atskiri atomai, o ne molekulės. Vienatomės dujos yra: helis, neonas, argonas ir kt.

Kadangi idealiųjų dujų molekulės nesąveikauja, tai jų potencinė energija lygi nuliui. Visą idealiųjų dujų vidinę energiją sudaro jų molekulių netvarkingo judėjimo kinetinė energija. Taigi vieno atomo vidutinę kinetinę energiją $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$ reikia padauginti iš atomų skaičiaus $N = \frac{m}{M}N_A$. Žinodami, kad $kN_A = R$, gauname tokią idealiųjų dujų vidinės energijos išraišką:

$$U = \frac{3m}{2M}RT. \quad (138)$$

Idealiųjų vienatomių dujų vidinė energija tiesiogiai proporcinga jų absoliučiajai temperatūrai.

Ji nepriklauso nuo tūrio (nes idealiųjų dujų sąveikos potencinė energija lygi nuliui) ir kitų makroskopinės sistemos parametrų. Tam tikros masės idealiųjų dujų vidinė energija kinta tik kintant jų temperatūrai:

$$\Delta U = \frac{3m}{2M}R\Delta T. \quad (139)$$

Iš formulės matyti, kad, padidinus dujų masę, padidėja ir jų vidinė energija ($U \sim m$). Vidinė energija priklauso ir nuo dujų rūšies, t. y. nuo jų molio masės $M\left(U \sim \frac{1}{M}\right)$. Juo didesnė molio masė M, tuo mažiau atomų yra tam tikros masės dujose.

Kai dujas sudaro sudėtingesnės molekulės nei vienatomės, tai jų vidinė energija irgi proporcinga absoliutinei temperatūrai, bet dydžių U ir T proporcingumo koeficientas yra kitas, nes sudėtingesnės molekulės ne tik slenka, bet ir sukasi. Tokių dujų vidinė energija lygi molekulių slenkamojo ir sukamojo judėjimo energijų sumai.

Realių dujų, skysčių ir kietų kūnų molekulių sąveikos vidutinė potencinė energija nelygi nuliui, nors ji daug mažesnė už vidutinę kinetinę energiją (tačiau kietų kūnų ir skysčių ji artima kinetinei energijai).

Molekulių sąveikos vidutinė potencinė energija priklauso nuo medžiagos tūrio, nes, kintant tūriui, kinta vidutiniai atstumai tarp molekulių. Todėl bendriausiu atveju vidinė energija priklauso ne tik nuo temperatūros t, bet ir nuo tūrio V.

Kai procesas izoterminis, idealiųjų dujų sistemos vidinė energija nekinta. Bet kuo aukštesnė temperatūra, tuo didesnė ir sistemos vidinė energija.

Klausimai ir užduotys

1. Aprašykite pavyzdžius, iliustruojančius, kaip technikoje ir buityje mechaninė energija virsta vidine, o vidinė – mechanine energija.

2. Nuo kurių fizikinių dydžių priklauso vidinė kūno energija?

3. Kurių tos pačios temperatūros dujų (vandenilio ar helio) vieno molio vidinė energija yra didesnė?

4. Kam lygi vienatomių idealiųjų dujų vidinė energija?

5. Kaip pakis vienatomių idealiųjų dujų vidinė energija, kai slėgis padidės tris kartus, o tūris sumažės du kartus?

6. Koks yra vienatomių dujų, užimančių 2 l tūrį, slėgis, jeigu jų vidinė energija 300 J?

7. Kokia yra vienatomių dujų, kurių tūris 4 l, o temperatūra 300 K, vidinė energija, kai šių dujų molekulių koncentracija lygi $4 \cdot 10^{22}$ m^{-3}?

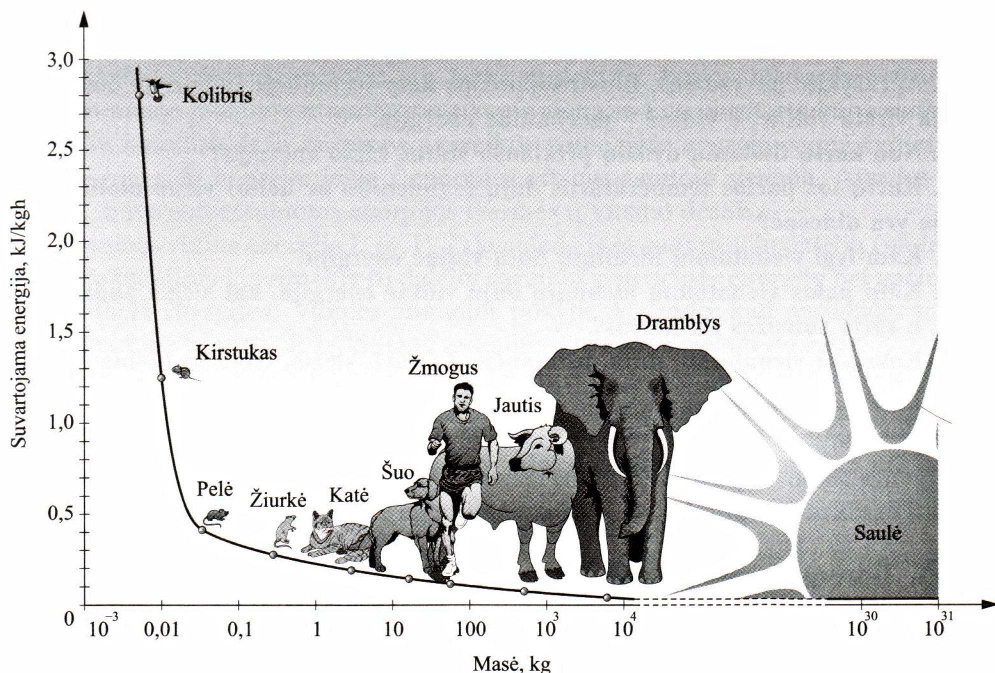
55. Darbas termodinamikoje

Sistemos vidinė energija kinta, kai: 1) pati sistema ir išorinės jėgos atlieka darbą; 2) vyksta šilumos perdavimas tarp skirtingos temperatūros kūnų. Šiluma perduodama trimis būdais: *šiluminiù laidumù, konvèkcija ir šiluminiù spinduliãvimu*.

Šiluminis laidumas yra būdingas kietiesiems kūnams. Įkaitinto kūno ar jo dalies atomai ima svyruoti greičiau, atsitrenkia į savo kaimynus, šie – į tolimesnius atomus, ir taip chaotiško judėjimo energija sklinda tolyn. Be to, metaluose šilumą perduoda tarp atomų eilių klaidžiojantys laisvieji elektronai, susidauždami su atomais ir kitais elektronais. Tad **metalai – geriausi šilumos laidininkai**. Pradedant jais, visas medžiagas galima išdėstyti į eilę šiluminio laidumo mažėjimo tvarka iki gerų šilumos izoliatorių. Pastarieji – tai korėtos medžiagos su oro tarpais.

Konvekcija – tai šilumos pernešimas srovėmis, kurios susidaro nevienodai įkaitusiuose skysčiuose arba dujose, nes jų tankis priklauso nuo temperatūros. Įšilę skysčių ar dujų sluoksniai yra lengvesni (mažesnis jų tankis) ir kyla aukštyn, o į jų vietą leidžiasi šaltesni sluoksniai. Konvekcija vyksta ne tik kaitinant skystį puode ar šildomame kambaryje, bet Žemės atmosferoje bei vandenynuose, kur ji sukelia vėjus ir taifūnus, pastovias Golfo ar El-Ninjo sroves ir audras.

Bet koks kūnas, kurio temperatūra aukštesnė negu 0 K, skleidžia šiluminius spindulius. Suprantama, kad karštas radiatorius ar žmogaus kūnas jų spinduliuoja nepalyginamai daugiau negu ledas ar skystas azotas. Šie spinduliai yra tos pačios prigimties, kaip ir regimoji šviesa, tik ilgesnio bangos ilgio, t. y. jų sritis – už raudonųjų spindulių, todėl ir buvo pavadinti *infraraudonaĩsiais spinduliaĩs* (lot. *infra* – po). Saulė apie pusę savo spinduliuojamos energijos skleidžia infraraudonaisiais spinduliais, nors Žemės atmosfera praleidžia tik dalį jų. Tad šiluminis spinduliavimas yra ne kas kita, kaip infraraudonosios spektro dalies elektromagnetinių bangų spinduliavimas iš įkaitintų ar įkaitusių kūnų, kuriuose tarpusavio smūgių sužadintos dalelės, grįždamos į normaliąsias būsenas, išspinduliuoja perteklinę energiją.



Sąryšis tarp įvairių gyvūnų suvartojamos energijos (masės vienetui) pastoviai kūno temperatūrai palaikyti ir jų masės. Dešinėje palyginimui pateiktas šis sąryšis Saulei.

110 pav.

Kūnas, kurio temperatūra yra aukštesnė negu aplinkos, netenka tuo daugiau šilumos, kuo didesnis yra kūno paviršiaus plotas (pro kurį šiluma sklinda). Tai galioja tiek įkaitusiam metalo gabalui, tiek gyvūnui. Žinome, kad kūno paviršiaus plotas yra proporcingas kūno skersmens kvadratui, o gyvūno masė, kaip ir jo tūris – proporcingi skersmens kubui. Darome išvadą – *kuo didesnis gyvūnas, tuo mažiau energijos (masės vienetui) jis suvartoja pastoviai kūno temperatūrai palaikyti* (110 pav.).

Sąryšis tarp įvairių gyvūnų suvartojamos energijos (masės vienetui) pastoviai kūno temperatūrai palaikyti ir jų masės. Dešinėje palyginimui pateiktas šis sąryšis Saulei.

Įvairių kūnų skleidžiami šilumos, arba infraraudonieji, spinduliai leidžia matyti juos ir naktį. Tam tikslui gaminami naktinio matymo prietaisai. Apie juos plačiau pradėta kalbėti po to, kai 1986 m. anglų kariuomenė, naudodamasi tokiais prietaisais, laimėjo lemiamą naktinį mūšį prieš argentiniečius kare dėl Folklendo salų. Tokiais prietaisais patogu naudotis naktinės gamtos mylėtojams.

Yra du būdai matyti tamsoje: apšviesti daiktus infraraudonųjų spindulių prožektoriumi (toks prietaisas jau yra išrastas) arba stebėti tiesioginį kūnų spinduliavimą – tada reikalingi jautresni prietaisai.

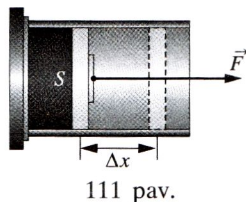
Gaminami naktinio matymo žiūronai, monokliai ir net akiniai, tiesa, didesni už mums įprastus akinius. Visi jie neregimus šilumos spindulius paverčia regimaisiais spinduliais. Infraraudonieji spinduliai išmuša iš jiems jautrios medžiagos mažyčius elektronus. Pagreitinti jie bombarduoja stiklą, padengtą švytalu (tarsi televizoriaus ekraną),

kurio švytėjimas sukelia matomą vaizdą. Sukurti mažo dydžio prietaisus buvo įmanoma tik panaudojus naujausias technologijas.

Taigi darbas ir šilumos perdavimas – dvi skirtingos vidinės energijos perdavimo formos. **Atliekant darbą, perduodama tvarkingo dalelių judėjimo energija, o vykstant šilumos apykaitai – netvarkingo šiluminio dalelių judėjimo energija.**

Dùjų plėtìmasis – tai vienas pagrindinių termodinaminių procesų, vykstančių daugelyje šiluminių mašinų. Izobariškai besiplėsdamos, dujos atlieka darbą. Jį galima apskaičiuoti.

Tarkime, cilindre po stūmokliu esančios dujos izobariškai plečiasi ir jų tūris pakinta nuo V_1 iki V_2, o stūmoklis cilindre pasislenka atstumu Δx (111 pav.).



111 pav.

Pasinaudodami mechaninio darbo samprata $\Delta A = F\Delta x$ (čia F – slėgio jėga, Δx – stūmoklio poslinkis), apskaičiuosime darbą, kurį atlieka izobariškai besiplėsdamos dujos. Kadangi slėgio jėga $F = pS$, o $S\Delta x = \Delta V$, tai

$$\Delta A = p\Delta V; \tag{140}$$

čia p – dujų slėgis, ΔV – jų tūrio pokytis ($\Delta V = V_2 - V_1$).

Izobarinio dujų plėtimosi darbas lygus slėgio p ir dujų tūrio pokyčio ΔV sandaugai.

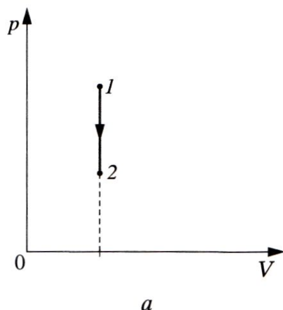
Matome, kad dujos atlieka darbą tik tada, kai kinta jų tūris. Jeigu darbą atlieka išorinės jėgos – dujos suslegiamos, jų tūris mažėja, tai pačių dujų darbas yra teigiamas, o išorinių jėgų – neigiamas ($\Delta V < 0$).

Dujų plėtimosi darbas, kurį jos atlieka, pereidamos iš vienos būsenos į kitą, yra lygus elementariųjų darbų sumai. Grafiškai jis lygus plotui po termodinaminį procesą vaizduojančia kreive.

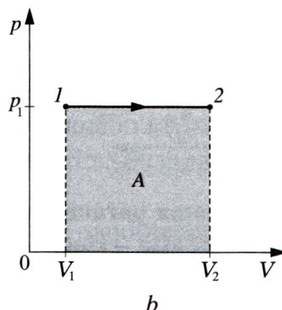
Kai procesas izochorinis, dujos nesiplečia ir darbo neatlieka: plotas po vertikalia tiese (p, V) diagramoje lygus nuliui (112 pav., *a*).

Izobarinio dujų plėtimosi darbo skaitinė vertė lygi stačiakampio plotui (112 pav., *b*):

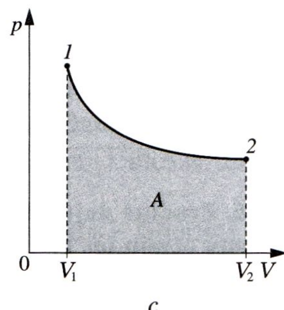
$$A = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M}R(T_2 - T_1). \tag{141}$$



a



b



c

112 pav.

Vadinasi, norint kad izobariškai besiplėsdamos dujos atliktų darbą, jas reikia šildyti.

Palyginę figūrų, esančių po izoterme ir izobare, plotus (112 pav., *c*), galime padaryti tokią išvadą: kai pradinis dujų slėgis vienodas, izobarinio dujų plėtimosi nuo tūrio V_1 iki tūrio V_2 darbas yra didesnis už izoterminio plėtimosi darbą.

Remdamiesi 140 ir 141 lygtimis, izoterminio dujų plėtimosi darbą išreikšime tokia lygtimi:

$$A = pV_2 - pV_1 = \frac{RT}{M}(m_2 - m_1). \tag{142}$$

Gautojo darbo skaitinė vertė, kaip jau minėjome, lygi plotui po izoterme (112 pav., *c*).

Prietaisai ir įrengimai, kurie veikia varomi suslėgto oro, vadinami *pneumãtiniais*. Tai pramonėje naudojami presai, vibratoriai, transporteriai, audimo staklių šaudyklės ir kt. Transporto priemonėse suslėgtas oras varsto duris, nuspaudžia stabdžius. Pneumatiniais mikrovarikliais valdomi orbitoje kosminiai laivai. Pastaruoju metu įvairiose šalyse projektuojamos ir statomos pneumoakumuliatorinės elektrinės. Naktį, kai yra elektros perteklius, jos kaupia energiją – suslegia orą milžiniškuose rezervuaruose. Suslėgto oro energija vėl paverčiama elektros energija, kai jos trūksta.

Klausimai ir užduotys

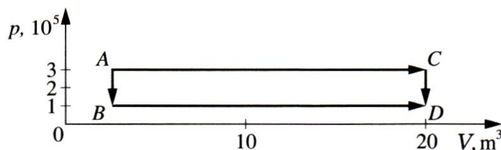
1. Kodėl slegiamos dujos šyla?

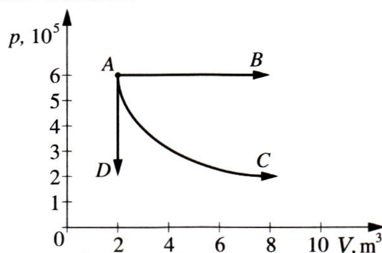
2. Kokios formos namai spinduliuotų mažiausiai šilumos į išorę?

3. Cilindre yra 2 kg vandenilio. Dujos kaitinamos nuo 27 °C iki 127 °C. Kokį darbą jos atlieka, jeigu slėgis išlieka pastovus?

4. Pneumatinio kūjo strypelį stumia suspaustas oras. Stūmokliui judant, oro masė cilindre pakinta nuo 0,1 iki 0,5 g. Oro slėgis cilindre ir temperatūra (27 °C) pastovūs. Oro molio masė 0,029 kg/mol. Nustatykite dujų atliekamą darbą per vieną stūmoklio eigą.

5. Iš būsenos *A* į būseną *B* dujos pereina dviem būdais: a) per tarpinę būseną *C*; b) per būseną *D*. Kokiu atveju atliekamas didesnis darbas?

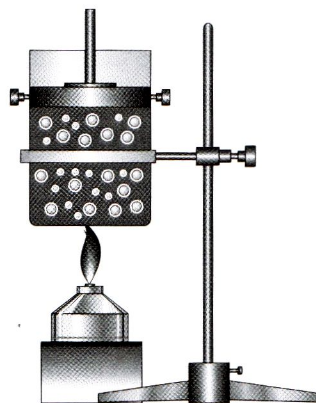




6. Pradinė dujų būsena apibūdinama parametrais p_1 ir V_1. Kol dujos užima tūrį V_2, vienu atveju jos plečiasi izobariškai, kitu – izotermiškai. Kuriuo atveju atliekamas didesnis darbas?

7. Išvardykite grafike pavaizduotus procesus. Kokiu atveju atliekamas didžiausias darbas? Kokia yra jo skaitinė vertė?

56. Šilumos kiekis



113 pav.

Jeigu stūmoklis įtvirtintas (113 pav.), tai kaitinamų dujų tūris nesikeis, o temperatūra ir vidinė energija didės. Vieno kūno energijos perdavimas kitam kūnui neatliekant darbo vadinamas *šilumõs apýkaita*, arba šilumos perdavimu.

Vidinė energija, perduota kūnui šilumos apykaitos būdu, vadinama šilumõs kiekiù (žymima Q). Šilumos kiekiu taip pat vadinama energija, kurią kūnas atiduoda šilumos apykaitos metu.

Šilumos kiekio, kaip ir mechaninės energijos, tarptautinėje SI vienetų sistemoje matavimo vienetas yra *džáulis*: $[Q] = \text{J}$. Gana plačiai paplitęs ir nesisteminis vienetas *kalòrija* (cal): 1 cal = 4,19 J.

Vykstant šilumos apykaitai, kūnų susilietimo vietoje lėtai judančios šalto kūno molekulės sąveikauja su greitesnėmis karšto kūno molekulėmis. Po tam tikro laiko molekulių kinetinė energija nusistovi ir tampa beveik vienoda. Todėl šalto kūno molekulių greitis padidėja, o karšto – sumažėja. Šių procesų metu vienos rūšies energija nevirsta kitos rūšies energija, bet dalis karšto kūno energijos perduodama šaltam kūnui.

Kad m masės kūno temperatūra padidėtų nuo T_1 iki T_2, jam reikia suteikti šilumos (bet kurios energijos) kiekį, proporcingą kūno masei ir temperatūrų skirtumui:

$$\Delta Q = mc\,(T_2 - T_1). \quad (143)$$

Čia c – **kūno savitõsios šilumõs skaitinė vertė, lygi šilumos kiekiui, kurio reikia 1 kg medžiagos temperatūrai pakelti vienu kèlvinu:** $c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T}$. Ji matuojama $[c] = \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ ir priklauso nuo kūno prigimties, proceso pobūdžio (izobarinis ar izochorinis) ir nuo temperatūros.

Šeimininkės žino, kad vienus valgius reikia skubėti dėti ant stalo, o kiti, pavyzdžiui, kepti obuoliai ar kepiniai su jais, gali apdeginti ir po gana ilgo laiko. Įvairūs kūnai nevienodai sugeria šilumą ir šaldomi nevienodai ją atiduoda.

Labai didelė vandens savitoji šiluma. Ji lygi 4190 J/kgK arba 1 cal/gK (tai buvo naudojama apibrėžti 1 kalorijai kaip šilumos kiekiui, kuris reikalingas 1 g vandens temperatūrai pakelti vienu laipsniu). Ši antroji vandens anomalija taip pat labai svarbi gyvybei Žemėje. Didelis vandens kiekis Žemės paviršiuje dėl vandens skaidrumo bei didelės savitosios šilumos (žemės ir smėlio savitoji šiluma yra maždaug 5 kartus mažesnė) veikia kaip šilumos akumuliatorius, išlyginantis paros bei sezonų kaitos temperatūrų svyravimus.

Be savitosios šilumos, kartais naudojamas kitas fizikinis dydis – **šilumìnė talpà, kuri lygi kūno savitosios šilumos ir jo masės sandaugai**:

$$C = cm. \quad (144)$$

Kai kūnas atiduoda šilumos kiekį ΔQ, jo temperatūra sumažėja dydžiu ΔT. Jeigu sistemą sudaro keli kūnai, vieni jų gali atiduoti šilumą, o kiti jos gauti. Todėl, kai sistemos gautų ir atiduotų šilumos kiekių algebrinė suma lygi nuliui, tai jos šilumos balanso lygtis yra tokia: $\left(\sum \Delta Q\right)_{\text{gaut}} = \left(\sum \Delta Q\right)_{\text{atid}}$.

Pagrindinis šilumos šaltinis yra degantis kuras – kietas (anglis, medis, durpės), skystas (benzinas, žibalas) ir dujinis (įvairios dujos). Svarbiausia kuro charakteristika – **kùro degi̇̀mo šilumà** q (savitoji degimo šiluma), **kuri lygi šilumos kiekiui, išsiskiriančiam sudegus 1 kg kuro**:

$$q = \frac{Q}{m}. \tag{145}$$

Iš tikrųjų ne visas išsiskyręs šilumos kiekis šildo kūną – dalis jo šildo ir aplinką. Todėl įvairių mechanizmų tikslingai suvartotai energijai apibūdinti įvedama *šildytùvo naudingùmo koeficieñto* η sąvoka. *Šildytuvo naudingumo koeficientu vadinamas naudingai suvartoto ir išsiskyrusio šilumos kiekio santykis:*

$$\eta = \frac{Q_{\text{naud}}}{Q_{\text{išsisk}}} 100\%. \tag{146}$$

Vartojamas ir branduolinis kuras. Jo nereikia deginti, nes šiluma išsiskiria skaldant arba jungiant branduolius.

7 lentelė

Specifiniai dydžiai vidinės energijos pokyčiui apibūdinti

Dydžio pavadinimas	**Žymėjimas**	**Apskaičiavimo formulės**	**Kas žymima**
1. Savitoji šiluma	c	$c = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)}$	Šilumos kiekis, kurį reikia suteikti 1 kg medžiagos, kad temperatūra pakiltų vienu laipsniu.
2. Šiluminė talpa	C	$C = cm$	Šilumos kiekis, kurio reikia, kad viso kūno temperatūra pakistų vienu laipsniu.
3. Savitoji lydymosi šiluma	λ	$\lambda = \frac{Q}{m}$	Šilumos kiekis, kurio reikia kristalinės medžiagos 1 kg išlydyti lydymosi temperatūroje.
4. Savitoji garavimo šiluma	L	$L = \frac{Q}{m}$	Šilumos kiekis, kurio reikia 1 kg skysčio išgarinti virimo temperatūroje.
5. Degimo šiluma	q	$q = \frac{Q}{m}$	Šilumos kiekis, kuris išsiskiria visiškai sudegus 1 kg kuro.

Klausimai ir užduotys

1. Ar galima teigti, kad temperatūra parodo šilumos kiekį kūne?
2. Kas yra šiluminė pusiausvyra?
3. Kokią – didelę ar mažą – savitąją šilumą turi medžiagos, kurios greitai įšyla?
4. Kodėl šildomojoje pūslėje naudojamas karštas vanduo, o ne oras?
5. Kodėl ežerų apsuptame Trakų mieste rudenį ežerams užšąlant būna 3–5 laipsniais šilčiau negu netoli esančiame Lentvaryje, o pavasarį ledui tirpstant – šalčiau?
6. Sumaišykite 2 l vandens, kurio temperatūra 20 °C, su 1 l vandens, kurio temperatūra 50 °C. Kokia bus mišinio temperatūra?
7. Kiek šilumos išskiria žmogus? Jeigu jis mažai juda ir nedirba fizinio darbo, tai beveik visa cheminė maisto energija sunaudojama aplinkai šildyti. Medikai teigia, jog žmogus per dieną suvartoja ne mažiau kaip 2000 kcal (medicinoje ir kulinarijoje ligi šiol šiluma ir energija matuojamos kalorijomis). Apskaičiuokite, kas labiau šildo kambarį – žmogus ar 100 W elektros lemputė?
8. Sniegui nutirpdyti 200 m^2 plote buvo panaudotas tirpdytuvas, kurio našumo koeficientas 45%. Kiek malkų teko jame sudeginti, jeigu sniego tankis buvo 200 kg/m^3, dangos storis 25 cm, oro temperatūra – 1 °C, o iš tirpdytuvo ištekančio vandens temperatūra 2 °C?
9. Šilumvežis, kurio galia 3000 kW, dirbdamas be pertraukos tris valandas, suvartoja 2400 kg dyzelinio kuro. Koks yra šilumvežio našumo koeficientas?

57. Pirmasis termodinamikos dėsnis

Pirmasis termodinamikos dėsnis – tai energijos tvermės dėsnis sistemoms, kurios gauna šilumos iš aplinkos (sistema – tai nagrinėjamoji fizikinė sistema: molekulių ar kūnų grupė, mašina, žmogaus organizmas ar net visa Žemės atmosfera).

Išskirtinis šio energijos tvermės dėsnio atvejis – kai, šilumai virstant vidine sistemos energija, atliekamas tam tikras mechaninis darbas. Pavyzdžiui, kaitinamas vanduo virsta garais ir suka turbiną.

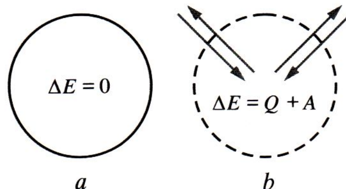
Sistemos vidinės energijos pokytis, jai pereinant iš vienos termodinaminės būsenos į kitą, lygus išorinių jėgų darbo ir gauto šilumos kiekio sumai: $\Delta U = A_{\text{iš}} + Q$.

Bendru atveju sistema ne tik gauna, bet ir atiduoda šilumą, todėl darbą gali atlikti ne vien pati sistema, bet ir išorinės jėgos jos atžvilgiu (114 pav.).

Vidinės energijos pokytis ΔU yra teigiamas, jeigu ji didėja, ir neigiamas, jeigu ji mažėja. Darbas A yra neigiamas, jeigu jį atlieka ne išorinės jėgos (sistemos atžvilgiu), o pati sistema prieš išorines jėgas ($A = -A_{\text{iš}}$). Šilumos kiekis Q yra neigiamas, jeigu sistema ne gauna, o atiduoda šilumą. Taigi galime parašyti:

$$Q = \Delta U + A. \qquad (147)$$

Ši lygtis matematiškai išreiškia pirmąjį termodinamikos dėsnį: **sistemai suteiktas šilumos kiekis suvartojamas jos vidinei energijai padidinti ir plėtimosi darbui atlikti.**



114 pav.

114 paveiksle parodytos uždara (*a*) ir atvira (*b*) sistemos. Uždaros sistemos pilnutinė energija nekinta. Atvira sistema gali gauti arba atiduoti šilumą, atlikti darbą arba jos atžvilgiu gali būti atliekamas darbas.

Dėl energijos tvermės dėsnio atradimo pirmumo XIX a. viduryje ginčijosi net keliolika mokslininkų. Fizikos istorikai jį dažniausiai priskiria J. Majeriui (*Mayer*), Dž.Džauliui (*Joule*) ir H. Helmholcui (*Helmholtz*).

Atskleidus pirmąjį termodinamikos dėsnį, paaiškėjo, kad daugelį amžių trukę bandymai sukurti *ámžinąjį varìklį* (lot. *perpetuum mobile*), kuris atliktų darbą neimdamas energijos iš aplinkos ir nesikeisdamas pats, negali būti sėkmingi. Jeigu $\Delta U_{\text{vid}} = 0$ ir $Q = 0$, tai ir $A = 0$. Kaip matome, neįmanoma sukurti pirmos rūšies amžinojo variklio, jeigu sistema negaus energijos iš aplinkos.

Pirmąjį termodinamikos dėsnį galima pritaikyti visiems gamtos reiškiniams: **bet kurio reiškinio energija iš niekur neatsiranda ir niekur nepranyksta, ji tik iš vienos rūšies virsta kitos rūšies energija.**

Klausimai ir užduotys

1. Kokiu atveju vidinė energija nekinta?

2. Dujoms perduotas 500 J šilumos kiekis. Besiplėsdamos jos atliko 200 J darbą. Kaip pakito dujų vidinė energija?

3. Sandariai uždarytame inde šildomos dujos. Kaip šiuo atveju turi būti užrašytas pirmasis termodinamikos dėsnis?

4. Cilindre stūmoklis suspaudė dujas. Besiplėsdamos jos pakėlė stūmoklį į tam tikrą aukštį. Parašykite pirmąjį termodinamikos dėsnį šiam atvejui. Ar padidėjo dujų vidinė energija?

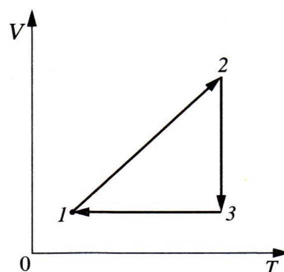
5. Idealiosios dujos izotermiškai plečiasi. Koks bus šilumos kiekis, jeigu dujos atlieka 200 J darbą?

6. Šildant dujas izobariškai, jų vidinė energija padidėja. Ar toks pat šilumos kiekis bus sunaudotas šildant dujas izochoriškai, jeigu vidinės energijos pokytis abiem atvejais vienodas?

7. Kokį darbą atliko 290 g masės oras, izobariškai pakaitintas 20 K? Koks šilumos kiekis jam buvo suteiktas ir koks jo vidinės energijos pokytis?

8. Adiabatiškai besiplėsdamos dujos atliko 150 J darbą. Kaip pasikeitė jų vidinė energija, temperatūra?

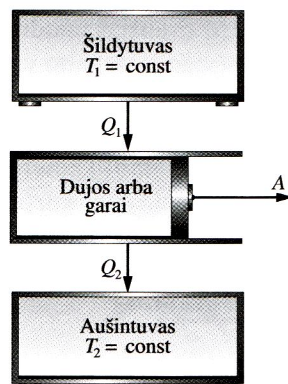
9. Išanalizuokite paveiksle pavaizduotus *1–2*, *2–3* ir *3–1* procesus. Koks – teigiamas ar neigiamas – yra dujų atliktas darbas? Nustatykite, ar dujos gavo, ar atidavė šilumą kiekvieno proceso metu.



58. Šiluminis variklis

Šiluminiù varikliù (mašinà) vadinamas įrenginys, kuris kuro šiluminę energiją paverčia mechanine energija.

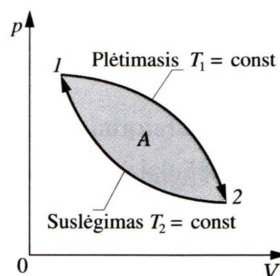
Prancūzų inžinierius S. Karno (*Carnot*) išnagrinėjo idealią mašiną, kuri šilumą paverstų darbu, ir įrodė, kad ji būtinai turi būti sudaryta iš trijų pagrindinių dalių: *dárbo mẽdžiagos (dujų, garų),* T_1 temperatūros *šildytùvo ir* T_2 temperatūros *aušintùvo* (115 pav.). Vidaus degimo ir reaktyviojo variklio aušintuvas yra aplinkos oras.



115 pav.

Kaitinama darbo medžiaga gauna iš šildytuvo šilumos kiekį Q_1 ir todėl plečiasi, kartu atlikdama darbą A. Po to ji suslegiama iki pradinės būsenos. Kuo mažesnį slėgimo darbą reikia atlikti, tuo naudingesnis šiluminis variklis. Prieš suslėgimą dujos atvėsinamos (jos netenka šilumos kiekio Q_2). Suslėgtos dujos vėl gauna šilumos kiekį Q_1, ir procesas kartojasi. Toks variklis veikia cikliškai. Paprasčiausio variklio veikimo ciklas parodytas 116 paveiksle. Pilkos spalvos plotas lygus variklio mechaniniam darbui:

$A = Q_1 - Q_2 > 0$, nes plotas po viršutine kreive yra didesnis negu plotas po apatine kreive.



116 pav.

Šiluminio variklio naudingumo koeficientas rodo, kuri gauto šilumos kiekio dalis virsta naudingu darbu:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \tag{148}$$

Šioje lygtyje šilumos kiekius galima pakeisti atitinkamomis temperatūromis. Tuomet gauname:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \tag{149}$$

Kadangi aušintuvo temperatūra niekada nėra lygi absoliutiniam nuliui, tai ir idealios šiluminės mašinos naudingumo koeficientas yra mažesnis už vienetą ($\eta < 1$).

Bet kurioje realioje mašinoje (variklyje) susidaro papildomi energijos nuostoliai dėl šilumos nutekėjimo į aplinką, trinties ir t. t., todėl pateiktoji koeficiento formulė išreiškia didžiausią galimą koeficiento reikšmę.

Nesunku apskaičiuoti, – jei šildytuvo temperatūra bus lygi verdančio vandens temperatūrai (T_1 = 373 K), o aušintuvo – užšąlančio vandens temperatūrai (T_2 = 273 K), tai naudingumo koeficientas bus lygus tik 27%. Net ir naudojant šiluminėse elektrinėse perkaitintus vandens garus (T_1 = 500 K), jų realus naudingumo koeficientas sudaro tik apie 40%. Todėl elektros energiją naudoti butams šildyti visada bus brangiau negu tiesiogiai vartoti kurą. Mat tiesiogiai kūrenant įmanoma pasiekti naudingumo koeficientą, artimą 100%, – tai neprieštarauja jokiam termodinamikos dėsniui.

Mažiausias naudingumo koeficientas yra lygus 12% (garo mašinos), didžiausias – 40% (vidaus degimo variklio). Naudingumo koeficientą galima padidinti šiais būdais: 1) didinant šildytuvo ir aušintuvo temperatūrų skirtumą (tačiau T_1 didinti trukdo kuro degimo kameros medžiagų lydymosi temperatūra, o mažinti T_2 – aplinkos temperatūra); 2) gerinant kameros ir kitų dalių šilumos izoliaciją; 3) mažinant judančiųjų dalių trintį; 4) gerinant kuro kokybę ir t.t.

8 lentelėje pateikti įvairių rūšių variklių taikymo pavyzdžiai.

8 lentelė

Šiluminiai varikliai ir jų taikymas

Šiluminių variklių rūšys	**Taikymo pavyzdžiai**
1. Garo turbinos	Šiluminėse ir atominėse elektrinėse
2. Karbiuratoriniai stūmokliniai vidaus degimo varikliai	Automobiliuose
3. Dyzeliniai varikliai	Traktoriuose, automobiliuose
4. Garo mašina	Geležinkelio transporte
5. Elektriniai šiluminiai varikliai	Elektrovežiuose
6. Turboreaktyviniai varikliai	Lėktuvuose
7. Reaktyviniai varikliai	Raketose

Gamtos apsaugos požiūriu vietoj benziną vartojančių variklių tikslinga naudoti dyzelinius variklius, kadangi dyzeliniame kure nėra švino junginių. Daug tikimasi iš elektromobilių ir automobilių, kurių variklių kuras yra dujos, pavyzdžiui, naudojant vandenilio dujas, joms sudegus, išsiskiria vanduo. Taip sumažėja išmetamų į aplinką kenksmingų medžiagų (azoto ir sieros junginių, anglies dvideginio) kiekis.

Šiuo metu plačiausiai paplitusi mašina – benzinu varomas vidaus degimo variklis, naudojamas daugelyje automobilių. Tokio variklio darbo ciklą sudaro keturios dalys, vadinamos taktais (117 pav.).

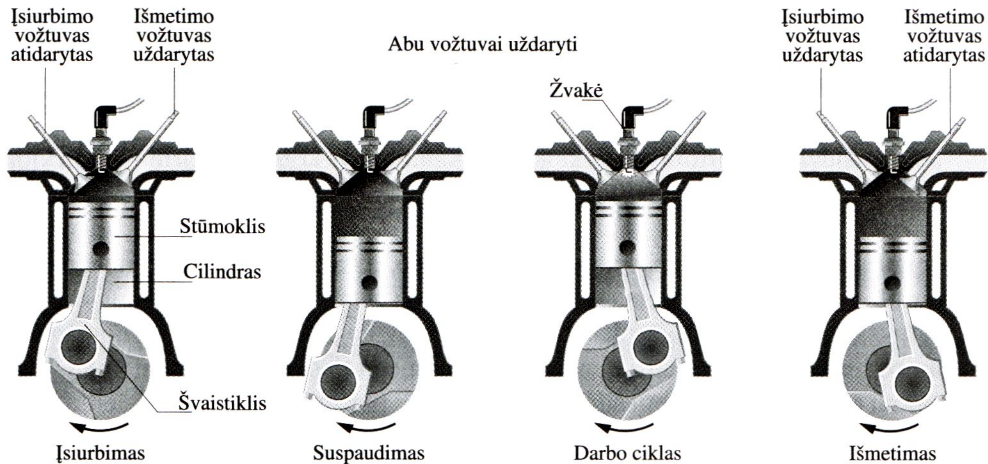
Įsiurbimas – judant stūmokliui cilindru žemyn, į cilindrą įsiurbiamas oro ir benzino mišinys.

Suspaudimas – veikiamas besisukančio smagračio, stūmoklis kyla aukštyn ir suspaudžia degųjį mišinį.

Darbo taktas – speciali žvakė įžiebia kibirkštį, kuri uždega mišinį. Įkaitę degimo produktai plečiasi ir stumia stūmoklį žemyn.

Išmetimas – degimo produktai pašalinami pro išmetimo vamzdį į aplinką. Po to ciklas kartojamas.

Tokiame variklyje šildytuvo vaidmenį atlieka cilindras, o aušintuvo – aplinka. Teorinis variklio naudingumo koeficientas yra apie 55%, bet realiuose varikliuose jis sumažėja maždaug perpus, t. y. tik ketvirtadalis benzino degimo energijos paverčiamas



Keturių taktų benzininio variklio veikimo schema.

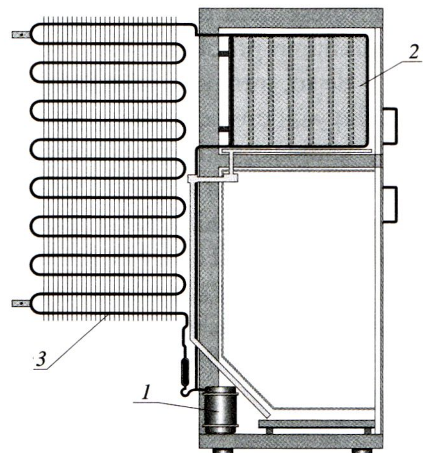
117 pav.

mechaniniu darbu. Papildomi energijos nuostoliai susidaro nevisiškai sudegus kurui, dėl šilumos sklaidos pro cilindro sieneles ir dėl trinties.

Karno mašiną galima priversti veikti priešinga kryptimi: atimant šilumą iš aušintuvo, atiduoti ją šildytuvui. Tai įmanoma tik išorinei jėgai atliekant darbą. Būtent tokia atvirkštinė mašina yra šaldytuvas.

Buitiniame šaldytuve pritaikytas jau žinomas reiškinys – garams virstant skysčiu, šiluma išsiskiria, o skysčiui garuojant, šiluma sugeriama iš aplinkinių kūnų.

Šaldytuve uždarais vamzdžiais cirkuliuoja lakus ir žemoje temperatūroje verdantis skystis, pavyzdžiui, freonas, antifrizas, chaldonas ir kt. Kompresorius, sukamas nedidelio galingumo elektros variklio, suspaudžia šį skystį, pvz., freoną, ir pumpuoja jį kondensatoriaus vamzdeliais, išvedžiotais šaldytuvo nugarėlėje, kur oro atvėsintas ir suspaustas freonas suskystėja (118 pav.). Jis teka aukštyn, išsiplečia garintuve – vamzdeliuose, supančiuose šaldymo kamerą, čia užverda, atimdamas šilumą iš kameros. Toliau freonas grįžta į kompresorių, ir ciklas kartojasi. Todėl, valant kamerą, labai svarbu nepažeisti šaldytuvo vamzdelių, kad šaldymo skystis neišbėgtų iš savo uždaro rato.



Buitinio šaldytuvo schema:
1 – kompresorius; *2* – šaldymo kamera;
3 – kondensatorius.

118 pav.

Šaldytuvo efektyvùmo koeficientù (efektyvumù) vadinamas iš šaldytuvo atimtos šilumos santykis su šaldytuvo suvartota energija. Įdomu tai, kad šis santykis būna didesnis už vienetą,

įprastinio šaldytuvo jis siekia 4. Tai nepažeidžia jokio termodinamikos dėsnio: juk šaldytuve elektros energija yra panaudojama tik darbui atlikti – šiluma atimama iš šaldytuvo ir perduodama aplinkai – kambario orui. Todėl suvartota energija gali būti mažesnė už perduodamos vidinės energijos kiekį.

Jeigu šaldytuvo garintuvą perkelsime į kambarį, o kondensatorių – į koridorių ar ventiliacijos angą, tai šaldytuvas virs oro kondencionieriumi, vėsinančiu kambario orą.

Jeigu kondencionierių pastatysime kambaryje, o garintuvą – lauke, gausime šilumos siurblį. Jis pumpuoja šilumą iš šaltos aplinkos į šiltą kambarį. Toks įrenginys (kaip ir šaldytuvas) perpumpuoja gerokai daugiau šilumos, negu suvartoja energijos. Vadinasi, šilumos siurbliu galima gauti daugiau šilumos, negu tiesiogiai deginant anglį ar mazutą namui apšildyti. Šiuo metu šilumos siurbliai vis plačiau naudojami užsienio šalyse. Reikia tikėtis, kad po kelerių metų juos matysime ir savo kiemuose.

Šiluminiai varikliai veikia aplinką, nes pagal termodinamikos dėsnius, gaminant elektros ir mechaninę energiją, daug šilumos išsiskiria į aplinką. Dėl to didėja vidutinė Žemės temperatūra. Jei ji ir toliau taip sparčiai kils, gali pradėti tirpti ledynai ir katastrofiškai pakils vandenynų lygis.

Žemės temperatūra gali pakilti ir dėl didėjančio atmosferoje anglies dioksido (CO_2) kiekio, kuris išsiskiria sudegus dideliems kuro kiekiams. Anglies dioksidas kartu su vandens garais atmosferoje sukelia vadinamąjį „šiltnamio efektą“.

Anglies dioksido tūrinis koncentracijos didėjimas gali smarkiai sutrikdyti šilumos balansą Žemėje (jau dabar į atmosferą kasdien išmetama apie 5 milijardus tonų CO_2).

Šiluminės elektrinės, automobilių vidaus degimo varikliai išmeta į atmosferą gyvūnams, augalams ir žmonėms kenksmingas medžiagas: sieros junginius (degant akmens anglims), azoto oksidus, angliavandenilius, anglies oksidą (CO) ir kt. Atominėse elektrinėse nėra pilnai išnaudojamos radioaktyviosios atliekos, todėl iškyla pastarųjų sunaikinimo problema.

Be to, įrengiant garo turbinas elektrinėse, panaudotiems garams atšaldyti reikia didelių vandens rezervuarų, todėl, didėjant elektrinių galiai, reikia daugiau vandens.

Vadinasi, didindami šiluminių variklių naudingumo koeficientą, turime įgyvendinti daug gamtos apsaugos priemonių:

1) būtina padidinti į atmosferą išmetamų kenksmingų medžiagų valymo priemonių efektyvumą;

2) uždrausti eksploatuoti automobilius, kurių panaudotose dujose yra normatyvinius reikalavimus viršijančio CO;

3) ieškoti ir įdiegti naujas kuro rūšis, kurių išmetamose dujose nebūtų kenksmingų medžiagų (juo galėtų būti vandenilio ir deguonies mišinys, įvairios biokuro rūšys);

4) kuriami ir jau pradėti naudoti elektromobiliai, kurie ateityje turėtų konkuruoti su automobiliais;

5) vandens išteklių ir jo užimamo ploto ekonomijos sumetimais tikslinga statyti elektrinių (ypač atominių) kompleksus su uždaru vandens aprūpinimo ciklu.

Kita kryptis sprendžiant gamtosaugines problemas yra naudojamos energijos efektyvumo ir jos taupymo didinimas.

Klausimai ir užduotys

1. Kokiu fizikiniu požiūriu – mikroskopiniu ar makroskopiniu – nagrinėja reiškinius termodinamika?

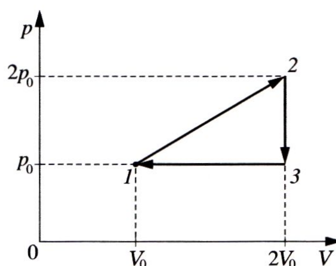
2. Kaitinant dujas, joms buvo suteikta 100 J šilumos. Plėsdamosi jos atliko 30 J darbą. Kaip pasikeitė dujų vidinė energija?

3. Ar šiluminės mašinos naudingumo koeficientas būtų lygus 1, jei ji veiktų be trinties?

4. Ar automobilio variklio naudingumo koeficientas padidėja, sumažėja ar lieka tas pats važiuojant labai šaltu oru? Kodėl?

5. Kodėl šiluminėse mašinose dažnai naudojamos aukštos temperatūros? Atsakymą pagrįskite.

6. Idealus šiluminis variklis ciklo metu iš 500 K temperatūros šildytuvo gauna 5000 J šilumos kiekį. Kokį šilumos kiekį jis atiduoda aušintuvui, kurio temperatūra 300 K? Apskaičiuokite darbą, atliktą vieno ciklo metu.



7. Dirbant vidaus degimo varikliui, cilindre susidaro 727 °C temperatūros dujos. Išmetamų dujų temperatūra 100 °C. Per valandą variklis suvartoja 36 kg dyzelinio kuro. Kokia yra didžiausia naudinga variklio galia?

8. Šiluminė mašina, kurios darbinis kūnas yra vienas molis idealiųjų dujų, dirba brėžinyje nurodytu ciklu. Koks yra jos naudingumo koeficientas?

9. Šiluminės mašinos šildytuvo temperatūra 227 °C, o aušintuvo temperatūra 27 °C. Apskaičiuokite didžiausią šios mašinos naudingumo koeficientą.

59. Grįžtamieji ir negrįžtamieji procesai gamtoje. Entropija

Energijos tvermės dėsnį apibūdiname dvejopai: kai vieni kūnai perduoda energiją kitiems ir kai kintant energijos formai, nustatome kiekybinį ryšį tarp energijos pokyčių. Bet šis dėsnis nenurodo, kuria kryptimi procesai gali ar negali vykti. Energijos tvermės dėsnis ir pirmasis termodinamikos dėsnis neprieštarauja, kad šiluma būtų perduodama iš šaltesnio kūno šiltesniam. Tačiau tam prieštarauja pati gamta. Visi gerai žinome, kad negali akmuo ar obuolys, ramiai gulintis ant žemės, įgauti kinetinės energijos dėl molekulių smūgių ir staiga savo vidinės energijos sąskaita pakilti aukštyn. Todėl labai svarbu nurodyti proceso ar veiksmo kryptį, kaip antai, pasakyti, kuria kryptimi sklinda šiluma. Tuo tikslu fizikoje įvedamos *grįžtamųjų ir negrįžtamųjų procesų* sąvokos.

Negrįžtamaisiais vadinami tokie procesai, kurie priešinga kryptimi savaime nevyksta. Kad jie vyktų priešinga kryptimi, reikia pašalinio poveikio. Pavyzdžiui, dujos plečiasi savaime, o susispaudžia tik veikiamos pašalinės jėgos, todėl plėtimasis yra negrįžtamas procesas; darbą lengva paversti šiluma – padidinant netvarkingą dalelių judėjimą (kad

ir patrynus rankas vieną į kitą), tačiau betvarkį molekulių judėjimą paversti kryptingu judėjimu ar mechaniniu darbu beveik neįmanoma.

Gamtoje šiluma pati savaime sklinda tik iš karštesnių kūnų į šaltesnius, ir jokiomis aplinkybėmis vidinė energija negali savaime virsti to kūno mechanine energija. Todėl **šilumos perdavimas iš karštesnių kūnų šaltesniems ir kūno judėjimo energijos virsmas vidine energija yra negrįžtamieji procesai.** Tai ir yra antrasis termodinamikos dėsnis, kurį 1850 m. suformulavo Ciuricho universiteto profesorius Rudolfas Klauzijus (*Clausius*; 1822–1888).

Antrasis termodinamikos dėsnis paneigė idėją sukurti mašiną, kuri imtų šilumą iš bet kokios temperatūros kūnų ir visą ją suvartotų darbui, dalies neatiduodama žemesnės temperatūros kūnui. Iš čia darome išvadą, kad neįmanoma sukurti antrosios rūšies amžinojo variklio. Tokiu būdu teko atmesti fantastinę idėją apie Žemės gyventojų aprūpinimą energija naudojant neišsemiamas vandenynų vidinės energijos atsargas.

1865 m. R. Klauzijus įvedė naują fizikinį dydį – *entròpiją*, kuri turi gilią fizikinę ir net filosofinę prasmę.

Tarkime, jog turime du izoliuotus kūnus, kurių absoliutinės temperatūros T_1 ir T_2 ($T_2 > T_1$). Juos sulietus, per trumpą laiką žemesnės temperatūros kūnas įgaus nedidelį kiekį šilumos ΔQ_1, o antrasis neteks tiek pat šilumos, t. y. $\Delta Q_2 = -\Delta Q_1$.

Kūno entropijos pokytį apibrėžkime kaip to kūno įgyto arba atiduoto šilumos kiekio santykį su jo absoliutine temperatūra:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}. \quad (150)$$

Šilumai ΔQ_1 perėjus iš šiltesnio kūno į šaltesnįjį, abiejų kūnų entropija pasikeis tokiu dydžiu:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{\Delta Q_1}{T_1} - \frac{\Delta Q_1}{T_2} = \frac{\Delta Q_1 (T_2 - T_1)}{T_1 T_2} > 0. \quad (151)$$

Ši nelygybė nusako svarbų dėsningumą: **šilumai tekant iš šiltesnio kūno į šaltesnį, abiejų kūnų entropija didėja.**

Kūno entropijos pokytis per ilgą laiko tarpą gaunamas sudedant mažus pokyčius. Kadangi tekant šilumai iš šiltesnio kūno į šaltesnį, kiekvienas mažas pokytis ΔS yra teigiamas, jų suma irgi bus teigiama. Todėl visa tai apibendrinę, galime padaryti išvadą, jog **izoliuotos sistemos entropija linkusi didėti** (tai – dar vienas antrojo termodinamikos dėsnio formulavimas).

Visų realių procesų metu entropija auga. Tik idealiame cikliniame procese (nesant trinties, sūkurių ir t. t.) entropijos vertė išlieka ta pati. Dalies sistemos entropija gali sumažėti (nes mažėja šilumos netenkančio kūno entropija), bet tuo pat metu kitos dalies ji padidėja, ir visos sistemos entropija išauga.

Entropija didėja, kai riedantis vežimas sustoja, vaza nukrinta ant grindų ir sudūžta, pavasarį ištirpsta ežero ledas (šiais atvejais išsiskiria šiluma arba ji sklinda iš šiltesnio kūno į šaltesnį). Entropija mažėtų, jei stovintis vežimas pats pradėtų važiuoti, varomos molekulių smūgių, vazos šukės susilipintų atgal į vazą, ežeras karštą dieną užšaltų. Tačiau tokių reiškinių mes nematome.

Nors entropija ir reiškia kitimą, bet, kaip parodė Klauzijus, jos pokytis nepriklauso nuo to, kokiu būdu sistema pereina iš pradinės būsenos į galinę. Todėl **entròpija**, kaip ir energija, temperatūra, tūris ar slėgis, **apibūdina sistemos būseną**.

Skirtingai nuo energijos, entropija nelinkusi išsilaikyti, ji tik linkusi didėti.

Entropija didėja, kai kūnas įgauna šilumos, tada didėja kūno dalelių netvarkingo judėjimo greičiai arba suyra dalelių išsidėstymo tvarka (kietasis kūnas virsta skysčiu ar skystis dujomis). **Entropija didėja, kai tvarkingesnės energijos formos (mechaninė energija) virsta mažiau tvarkingomis jos formomis** (vidinė energija). Šilumai sklindant iš šiltesnio kūno į šaltesnį, mažėja skirtumai tarp jų molekulių judėjimo greičių, tie kūnai darosi mažiau tinkami naudoti kaip šildytuvas ir šaldytuvas šiluminėje mašinoje. Iš šių samprotavimų galima daryti išvadą, kad **entropija apibūdina netvarkos laipsnį sistemoje, taigi entropijos augimas reiškia netvarkos augimą, o savaiminių procesų metu netvarka didėja.**

Iš tikrųjų mes nuolat regime gamtoje savaiminį netvarkos augimą. Medžiagos susimaišo, skirtumai mažėja, daiktai linkę irti ir dužti, energija išsisklaido (tuo tarpu tvarka susidaro tik atliekant tam tikrą darbą, sistemai gaunant energijos iš šalies). Konkrečiau tai galima apibrėžti išsiaiškinus tikimybinę ir informacinę entropijos prasmę. Turint omenyje, kad **tvarkinga būsena mažiau tikėtina negu netvarkinga būsena** (vazos skeveldros gali būti išmėtytos bet kaip, o vazą jos sudaro tik vienu vieninteliu būdu), taisyklingas atomų išsidėstymas kristale yra mažiau tikėtinas negu jų atsitiktinis išsidėstymas skystyje ar dujose.

Remiantis tikimybių teorija, procesai, kuriuose entropija mažėtų, nėra kategoriškai neįmanomi, tik jų tikimybė labai maža. Dviejų sumaišytų skysčių molekulės gali, netvarkingai judėdamos, susirinkti skirtingose indo dalyse, tuomet skysčiai atsiskirtų. Vežimas gali pradėti pats judėti, susidarius nepaprastai retai situacijai, kai daugelis jo molekulių smogtų į kelią viena kryptimi. Tokius nukrypimus tikimybių teorija vadina *fliuktuãcijomis*.

Klauzijus pritaikė entropijos didėjimo dėsnį ne tik įprastoms kūnų sistemoms, bet ir visai Visatai. Jis teigė: „Visatos energija pastovi, Visatos entropija artėja prie maksimumo“.

Žvaigždės spinduliuodamos palaipsniui netenka energijos ir užgęsta, o jų energija išsisklaido kosmose. Laikui bėgant, įvairių Visatos dalių energija turėtų susilyginti, Visata turėtų virsti vienalyčiu chaosu, kuriame nustotų vykti bet kokios permainos ir kitimai. Visata pereitų į šiluminės pusiausvyros būseną, kas reikštų šiluminę jos mirtį.

Ši Visatos šiluminės mirties hipotezė buvo plačiai aptarinėjama ne tik fizikų, bet ir filosofų, rašytojų bei menininkų XIX a. pabaigoje. Anot to meto fiziko Liudvigo Bolcmano (*Boltzmann*), dabartinė gana tvarkinga Visatos būsena yra atsiradusi dėl gigantiškos fliuktuacijos. Po jos Visata palaipsniui artėja prie šiluminės pusiausvyros, bet kada nors, labai tolimoje ateityje, įvyks kita Visatos fliuktuacija ir prasidės naujas raidos etapas. Kadangi tokios fliuktuacijos tikimybė labai maža, tai ji vyksta nepaprastai lėtai – didelę laiko dalį Visata būna šiluminės pusiausvyros būsenos. Mes atsiradome retos fliuktuacijos laikotarpiu.

Šiuolaikinė kosmologija – mokslas, tiriantis Visatos raidą, rimtai nenagrinėja nei Klauzijaus, nei Bolcmano hipotezių apie Visatos likimą. Nuo to laiko fizikai pasidarė dar skeptiškesni ir nesiima spręsti neapibrėžtų visuotinių problemų. Visų pirma neaišku, ar Visata yra uždara sistema, nes antrasis termodinamikos dėsnis taikomas tik uždaroms sistemoms. Antra, kiekvienas dėsnis turi savo galiojimo ribas. Antrasis termodinamikos dėsnis nustatytas apibendrinant mus supančius reiškinius, vykstančius palyginti nedideliais atstumais, bet jis gali negalioti, kai atstumai nepaprastai dideli.

Klausimai ir užduotys

1. Kiek skiriasi 1 kg ledo ir 1 kg vandens entropijos 0 °C temperatūroje? Vienam kilogramui ledo ištirpinti reikia 330 kJ energijos.

2. Kaip pasikeis entropija sumaišius 2 kg vandens, kurio temperatūra 20 °C, ir 1 kg vandens, kurio temperatūra 80 °C?

3. Kokiomis sąlygomis entropija gali mažėti?

4. Parašykite referatą tema „Homo sapiens egzistavimas Žemėje ir entropijos didėjimo dėsnis“.

ELEKTRODINAMIKOS PAGRINDAI

Ilgą laiką mokslininkai net neįtarė egzistuojant elektrines jėgas, nors jos valdo mus supančius reiškinius. Juk fundamentinė gravitacijos jėga, viešpataujanti kosmose ir nulemianti Visatos sandarą bei evoliuciją, tampa labai silpna tarp mus supančių kūnų. Čia pasaulio įvairovę sąlygoja elektromagnetinės jėgos. Bet kokios stūmos, trinties, tamprumo, deformacijos jėgos, kurios susideda iš daugelio atomų sąveikos jėgų, yra elektrinių jėgų padarinys.

Šių dienų žmonija nežino ir neturi patogesnės, higieniškesnės ir universalesnės energijos kaip elektros energija. Ją galima perduoti tolimais atstumais, lengva paversti kitos rūšies energija. Pagamintos elektros energijos kiekis yra laikomas vienu iš svarbiausių valstybinės ekonominės veiklos rodiklių, todėl įtraukiamas į mūsų šalies statistinių suvestinių lenteles.

Elektrodinãmika – tai mokslas apie ypatingos materijos – elektromagnètinio laũko, sukeliančio įelektrintų kūnų arba elektringųjų dalelių sąveiką, savybes ir dėsningumus.

Elektromagnetinė sąveika sudaro galimybę matyti mus supančius kūnus, nes šviesa yra viena iš elektromagnetinio lauko pasireiškimo formų. Be šių jėgų nebūtų gyvybės, nes, nutrūkus elektromagnetinių jėgų veikimui, gyvybė iš karto žūva.

Dalelėms sąveikaujant mažiausiose gamtos sistemose – atomų branduoliuose, taip pat sąveikaujant kosminiams kūnams, elektromagnetinės jėgos labai reikšmingos, kai stiprioji sąveika (atstumas, kuriuo pastebima ši sąveika, yra 10^{-12} cm eilės) ir silpnoji sąveika (ji sukelia vienų elementariųjų dalelių virsmą kitomis ir vyksta ne didesniu kaip 10^{-16} cm atstumu) yra labai silpnos, o gravitacinė sąveika – kosminio masto. Atomo apvalkalo sandarą, atomų sukibimą molekulėje (chemines jėgas) ir makroskopinių kūnų susidarymą nulemia tik elektromagnetinės jėgos. Praktiškai neįmanoma aptikti reiškinių, kurie nebūtų susiję su elektromagnetinių jėgų veikimu.

Elektrodinaminės teorijos sukūrimas ir tolesnė jos plėtra padėjo kurtis tokioms technikos šakoms kaip *elektrotèchnika, energètinė elektrotèchnika bei informãcinė elektrotèchnika.*

Elektrotechnika – tai mokslo šaka, aprėpianti elektrinių ir magnetinių reiškinių teoriją ir jų praktinį taikymą. Šiuolaikinėje elektrotechnikoje galima įžvelgti dvi pagrindines kryptis – energetinę ir informacinę. Kiekvieną iš jų savo ruožtu galima išskaidyti į smulkesnes sritis, kurių nemaža dalis jau pripažįstamos kaip atskiri elektrotechniški mokslai.

Energetinė elektrotechnika nagrinėja problemas, susijusias su elektros energijos gamyba, jos perdavimu ir vartojimu pavertus ją kitos rūšies energija, pavyzdžiui, mechanine, šilumine, šviesos (elektros pavaros, elektrotermija, šviesos technika). Medžiagoms apdirbti taip pat gali būti naudojama elektros energija (elektrotechnologija: elektrochemija, elektroerozija, elektrinis suvirinimas ir kt.) arba elektronų ir jonų srautai (eljonika).

Informacinė elektrotechnika gvildena problemas, susijusias su elektros energijos pakeitimu informaciniais signalais, jų transformacija, laikymu ir perdavimu (automatika, elektronika, elektriniai ryšiai, skaičiavimo technika).

Visos elektrotechnikos sritys yra glaudžiai susijusios ir neretai sunku nustatyti jų tarpusavio ribas. Jų įtaisai sudaro tam tikrą, organiškai neatskiriamą dalį įvairiausių šiuolaikinių technologinių įrenginių. Antra vertus, kuriant įvairius ir labai skirtingus įrenginius, yra pritaikomi panašūs elektriniai ir magnetiniai reiškiniai, jų dėsniai.

Elektriniai ir magnetiniai gamtos reiškiniai buvo tiriami jau nuo seno. Iki XIX šimtmečio mokslininkų dėmesį labiausiai patraukė tais laikais tyrimams prieinamiausi elektrostatikos reiškiniai. Šioje srityje svarbių rezultatų yra pasiekę Viljamsas Gilbertas (*Gilbert*; 1544–1603), Bendžamenas Franklinas (*Franklin*; 1706–1790), Georgas Vilhelmas Richmanas (1711–1753), Šarlis Ogiustenas Kulonas (*Coulomb*; 1736–1806). Jų bei daugelio kitų mokslininkų ir išradėjų dėka buvo sukurtos pirmosios elektrostatinės mašinos, elektrinio krūvio kaupiklis – Leideno stiklinė, pradėta matuoti elektrostatinį krūvį Kulono svarstyklėmis. Įdomu pažymėti, kad pagal Vilniaus universiteto profesoriaus Tomo Žebrausko projektą buvo pagaminta elektros mašina, kuri veikė trinties principu. 1753 m. Vilniaus visuomenei buvo demonstruojama šios mašinos įskeliama kibirkštis – mikrožaibas.

Paskutiniajame XVIII a. dešimtmetyje labai didelio susidomėjimo susilaukė biologiniai L. Galvanio eksperimentai. Nors jis pats juos aiškino neteisingai, tai buvo jau paskutinis žingsnis elektrocheminio srovės šaltinio kūrimo kelyje. Iš principo naujas elektrinių reiškinių tyrimo etapas pradėtas 1800 m., kai A. Volta paskelbė sukūręs elektrocheminį elektros srovės šaltinį – Voltos stulpą, galintį sukelti gana didelę įtampą. Šis labai reikšmingas įvykis atvėrė naują – elektrodinamikos – erą. Buvo pradėta plačiai tirti elektros srovė ir jos sukeliami įvairūs fizikiniai reiškiniai.

XIX a. pirmojoje pusėje mokslas apie elektrą toliau buvo plėtojamas trimis kryptimis. Pirmoji – tai įvairių elektros srovės sukeliamų reiškinių atradimas ir tyrimai. Mokslininkai pastebi, tiria ir aprašo tokius svarbiausius reiškinius: šiluminius – 1800 m. A. Furkrua; šviesos – 1801 m. L. Tenaras ir N. Gotro; elektros lanką – 1802 m. Vasilijus Petrovas (1761–1834) ir 1810 m. Hamfris Deivis (*Davy*); magnetinius – 1820 m. Hansas Kristianas Erstedas (*Oersted*; 1777–1851); elektrocheminius – 1807 m. H. Deivis, 1833 m. Maiklis Faradėjus (*Faraday*; 1791–1867).

Sukaupus daug eksperimentinės medžiagos, ėmė ryškėti antroji kryptis: buvo formuluojami svarbiausieji elektrotechnikos dėsniai, reiškiniai aprašomi matematiškai. Tai kertiniai akmenys pamatų, ant kurių vėliau išaugo visa vėlesnė elektrotechnikos teorija ir praktika.

Greta elektrinių bei magnetinių reiškinių stebėjimų ir jų apibendrinimų atsirado trečiosios krypties – praktinio elektros srovės taikymo – užuomazgos. Buvo mėginta panaudoti apšvietimui elektros lanką, dėtos pastangos sukurti kaitinamąją lempą, elektros variklį bei elektromechaninį generatorių. Didesnės praktinės vertės šie ir daugelis kitų darbų neįgavo. Sėkmingiau elektros srovė buvo taikoma elektros ryšiui – *telegrãfui* (1832 m. Pavelas Šilingas ir 1837 m. Samjuelis Finlis Bryzas Morzė (*Morse*; 1791–1872)).

XIX šimtmečio viduryje pastebimos įvairių šalių mokslininkų pastangos sukurti pakankamai galingą ir tinkamą praktiškai naudoti elektros energijos šaltinį. Kuriant įvairias technines konstrukcijas, buvo pastebėti ir aprašyti įvairūs reiškiniai, vykstantys elektros mašinose. Didžiausią reikšmę toliau kuriant generatorius turėjo sužadinimo principo atradimas 1867 m. Jo autoriai – mokslininkai Ernestas Verneris fon Zymensas (*von Siemens*; 1816–1892) ir Čarlsas Vytstonas (*Wheatstone*; 1802–1875). Tais pačiais metais šį principą ir jo sąlygas matematiškai aprašė Džeimsas Klarkas Maksvelas (*Maxwell*; 1831–1879), bet jo darbas tais laikais didesnės įtakos elektros mašinų likimui neturėjo, nes buvo parašytas tų laikų inžinieriams ir išradėjams pernelyg sudėtinga matematine kalba.

Svarbiausiu 1869–1871 m. laikotarpio įvykiu laikomas tinkamo praktiškai naudoti elektromechaninio generatoriaus sukūrimas (Zenobas Gramas (*Gramme*; 1826–1901)). Tai buvo elektromagnetinis susižadinantis nuolatinės srovės generatorius – šiuolaikinių generatorių prototipas.

Z. Gramo generatorius buvo naudojamas ir kaip variklis, bet svarbiausia yra tai, kad jo techninės galimybės sudarė sąlygas pradėti plačiai naudoti elektros energiją praktiniams tikslams. Manoma, jog nuo Gramo generatoriaus elektrotechnika pradėjo formuotis kaip atskira technikos mokslo šaka. Sukūrus generatorių, atsirado stiprus akstinas kurti elektros energijos imtuvus. XIX šimtmečio pabaigoje tam jau buvo visos teorinės ir eksperimentinės prielaidos. Tuo laiku elektriniai dydžiai jau buvo gana tiksliai matuojami, todėl Vilhelmas Eduardas Vėberis (*Weber*; 1804–1891) pasiūlė absoliučiąją elektrinių ir magnetinių vienetų sistemą. Įvairių autorių eksperimentiniai duomenys bei Maiklio Faradėjaus (*Faraday*; 1791–1867) idėjos Dž. Maksvelo dėka įgavo griežtą matematinę formą ir tapo klasikine elektromagnetinio lauko teorija. 1888 m. Heinrichas Hercas (*Hertz*; 1857–1894) eksperimentiškai patvirtino, kad elektromagnetinės bangos realiai egzistuoja, o 1893 m. vokiečių mokslininkas Čarlsas Protėjas Steinmecas (*Steinmetz*; 1865–1923) pasiūlė matematinį metodą kintamosios srovės grandinėms tirti taikant kompleksinius skaičius.

1881 m. Paryžiuje įvyko pirmasis tarptautinis elektrotechnikų suvažiavimas bei surengta Pirmoji tarptautinė 15 šalių elektrotechnikos eksponatų paroda. Šio suvažiavimo metu buvo priimta absoliučiųjų elektrotechnikos vienetų sistema (svarbiausiems vienetams – *ampèrui, òmui, vòltui, kulònui* – jau pradėjome skaičiuoti trečiąjį šimtmetį).

Iš pradžių elektros energija ypač plačiai vartota apšvietimui. Tai buvo pati efektingiausia ir visuomenei suprantamiausia elektros energijos naudojimo sritis. Iki to laiko įvairūs mokslininkai ir išradėjai, kaip antai: 1854 m. – H. Gėbelis, 1860 m. – Dž. Svenas,

1872 m. – Aleksandras Lodyginas ilgai ieškojo būdų, kaip sukurti elektrinį šviesos šaltinį. Po ilgų ieškojimų 1876 m. buvo sukurta praktiškai vartoti tinkama Pavelo Jabločkovo žvakė ir 1879 m. – Tomo Alva Edisono (*Edison*) kaitinamoji lempa. Tatai tapo pasauline sensacija ir naujos techninės epochos pradžia.

Pirmoji elektrinė Lietuvoje buvo įrengta 1892 m. Rietave, G. Oginskio dvare. Jos energija buvo panaudota dvaro rūmams, parkui, ūkiniams pastatams, Rietavo bažnyčiai ir turtingesnių miestiečių butams apšviesti.

Nuolatinės srovės energija pradėta vartoti ne tik apšvietimui. Pramonėje jau buvo naudojami nuolatinės srovės varikliai. Jų mechaninės charakteristikos tenkino tuometinės pramonės poreikius.

Daugelis to meto mokslininkų ir išradėjų suvokė, kad kintamosios srovės šaltiniai turėtų būti paprastesni, todėl ir toliau buvo kuriami kintamosios srovės generatoriai. Vienfaziai generatoriai (Galilėjas Feraris (*Ferrari*; 1847–1897) ir Nikola Tesla (1856–1943)) plačiau nepaplito. Ypač plačiai imta taikyti trifazė srovė Michailui Dolivai-Dobrovolskiui 1888 m. sukūrus trifazį generatorių, 1889 m. – asinchroninį variklį su narvelio tipo rotoriumi ir 1890 m. – transformatorių bei 1891 m. pademonstravus pirmąją trifazę elektros energijos perdavimo (170 km) liniją.

Lietuvą sparčiai elektrifikuoti pradėta tik po antrojo pasaulinio karo. Nuo 1940 m. iki 1980 m. elektros energijos gamyba Lietuvoje padidėjo beveik 100 kartų. Lemiamą vaidmenį suvaidino Elektrėnų valstybinė rajoninė elektrinė, kurios galia 1800 MW. Pradėta eksploatuoti Ignalinos atominė elektrinė (projektinė galia – 6000 MW), Kaišiadorių hidroakumuliacinė elektrinė (projektinė galia – 1600 MW).

Visą suvartojamą elektros energijos kiekį galima sąlygiškai suskirstyti į dvi dalis. Pirmoji dalis skirta gamybinei žmogaus veiklai (pramonės, žemės ūkio produkcijai gaminti, transportui), antroji – tiesioginėms žmogaus reikmėms tenkinti (apšvietimui, vėdinimui, šildymui, maisto gamybai, kultūriniams poreikiams ir kt.).

Pramonėje didžiausias elektros energijos kiekis (apie 60–65%) suvartojamas elektros varikliuose paverčiant ją mechanine. Elektriniam apšvietimui tenka 10–12%, elektrotermijai ir elektriniam suvirinimui apie 10% pramonėje suvartojamos elektros energijos. Tuo tarpu ryšiai, radijas, televizija ir internetas suvartoja tik apie 2% šios energijos. Labai svarbu aprūpinti elektros energija statybas, transportą, žemės ūkio bendroves.

Sparčiai elektrifikuojama ir žmogaus buitis: gausėja įvairios buitinės aparatūros, mašinų, šildymo įrenginių. Elektra vis labiau padeda žmogui ilsėtis, atgauti fizines ir dvasines jėgas, sudaro sąlygas daugiau laiko skirti intelektualiam tobulėjimui.

Plečiantis elektros energijos gamybai ir didėjant elektrinių galiai, dideli elektros energijos nuostoliai sudaro labai svarbią ekologinę problemą. Tai – gamtos teršimas šiluma ir kuro degimo produktais.

Ekologiškai švariomis vadinamos tos elektrinės, kurios naudoja atsinaujinančius energijos šaltinius. Tai – vandens, saulės, vėjo, žemės gelmių šilumos elektrinės. Šiuo metu iš jų plačiausiai yra naudojamos hidroelektrinės, kurios gamina apie 21–23% visos pasaulyje gaminamos elektros energijos.

Didžiausias elektros energijos šaltinis yra Saulė, kuri per metus spinduliuoja į Žemę apie $7{,}5 \cdot 10^{17}$ kWh energijos. Palyginimui galime sakyti, kad 1980 m. Žemėje buvo suvartota apie $7{,}3 \cdot 10^{13}$ kWh visų rūšių energijos. Kitaip tariant, Saulės energija, paten-

kanti į ketvirtadalį Egipto teritorijos ploto, galėtų patenkinti viso pasaulio visų rūšių energijos poreikius.

Šiuo metu mokslininkų jėgos yra nukreiptos įvairioms energetinėms ir ekologinėms problemoms spręsti, iš kurių svarbiausiomis galime laikyti tokias: 1) kaip racionaliau paversti šiluminę energiją elektros energija; 2) kaip panaudoti valdomą termobranduolinę lengvųjų elementų sintezės reakciją elektros energijai gaminti; 3) kaip racionaliau išnaudoti atsinaujinančius elektros energijos šaltinius.

Išsprendus pirmąsias dvi problemas, energetiniai Žemės ištekliai būtų neriboti, bet tai nesumenkina šiluminio teršimo ekologinės grėsmės. Manoma, kad tai būtų tik tarpinė pakopa ir laikina išeitis, kol žmonija sugebės tiesiogiai panaudoti Saulės energiją savo energetiniams poreikiams tenkinti.

10 SKYRIUS. ELEKTROSTATIKA

Iš pradžių nagrinėsime paprasčiausią atvejį, kai įelektrinti kūnai nejuda. *Elektrodinamikos skyrius, kuris tiria nejudančių elektros krūvių tarpusavio sąveiką ir jų pusiausvyros sąlygas, vadinamas elektrostãtika.*

60. Elektros prigimtis

Gamtoje egzistuoja dviejų rūšių elektros krūviai – teigiamieji ir neigiamieji. Sukaupti kūnuose krūvį – kūnus įelektrinti galima, pavyzdžiui, juos patrinant. Oda patrintas stiklas įelektrinamas teigiamai, o pati oda – neigiamai; vilnone medžiaga patrintas gintaras arba ebonitas įelektrinamas neigiamai, o medžiaga – teigiamai.

Trindami du kūnus, visuomet vieną iš jų įelektriname teigiamai, o kitą – neigiamai, ir abiejų įgyti krūviai yra lygaus didumo, jeigu iki trynimo abu kūnai nebuvo įelektrinti. Mat *elektros krūviai nesukuriami ir neišnyksta, jie tik gali būti perduodami iš vieno kūno kitam arba gali pasislinkti to paties kūno viduje*. Tai yra elektros krūvių išsilaikymo dėsnis, patvirtintas daugybe įvairių bandymų.

Pagal elektros krūvių išsilaikymo dėsnį *bet kuriame neutraliame kūne egzistuoja vienodo didumo abiejų ženklų krūvininkai*. Trinant dalis elektros krūvininkų pereina iš vieno kūno į kitą, todėl abu kūnai įsielektrina priešingais vienodo didumo elektros krūviais.

Uždaroje sistemoje visų dalelių krūvių algebrinė suma nepakinta. Tai yra elektros krūvio tvermės dėsnis.

Jeigu dalelių krūvius pažymėsime q_1, q_2 ir t. t., tai

$$q_1 + q_2 + q_3 + ... + q_n = \text{const.} \tag{152}$$

Dalydami bet kurį elektros krūvį į vis mažesnes dalis, gauname mažiausius, daugiau nedalomus elementariuosius krūvius – tartum elektros atomus. Mažiausią neigiamąją elektringąją dalelę vadiname *elektronù*; jo krūvis lygus $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, o masė –

$9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg. Mažiausia teigiamoji elektringoji dalelė yra *pozitrònas*; jo krūvis ir masė yra lygūs elektrono krūviui ir masei, tik krūvis priešingo ženklo. Kadangi pozitronas yra nestabili dalelė, tai dažnai kalbama apie kitą mažiausią stabilią dalelę, turinčią tokį pat teigiamą elementarųjį krūvį ir vadinamą *protonù*. Protonas yra vandenilio atomo branduolys, jo masė 1836 kartus didesnė už elektrono masę ir lygi $1{,}672 \cdot 10^{-27}$ kg.

Protonai ir elektronai įeina į visų medžiagų atomų sudėtį; jie kartu yra ir medžiagos, ir elektros dalelės. Protonai kartu su *neutrònais* (panašios masės elementariosiomis dalelėmis, neturinčiomis elektros krūvio) sudaro atomų branduolius, o elektronai, besisukdami aplink branduolius, – atomų elektroninius apvalkalus. Kai elektronų skaičius lygus branduolio protonų skaičiui, atomas yra neutralus. Iš tokių atomų sudaryta medžiaga taip pat yra neutrali. Atomai ir molekulės, dėl trinties ar kitų priežasčių netekę elektronų, vadinami *teigiamaĩsiais jònais*, o įgavę elektronų perteklių – *neigiamaĩsiais jònais*. *Jono valentingumą nusako trūkstamų arba perteklinių elementariųjų krūvių skaičius.* Trinant du kūnus, vienas įsielektrina teigiamai, o kitas – neigiamai todėl, kad vieno kūno atomai arba molekulės netenka elektronų, o kito kūno atomai arba molekulės įgauna elektronų perteklių.

Neabejodami galime teigti, jeigu dalelės veikia viena kitą jėga, kuri, didėjant atstumui, silpnėja ir yra daug kartų didesnė už visuotinės traukos jėgą, tai sakoma, kad tos dalelės turi elektros krūvį. Pačios dalelės vadinamos *elektrìngosiomis*. *Yra dalelių, neturinčių elektros krūvio, bet nėra elektros krūvio, jei nėra dalelės.*

Elektringųjų dalelių sąveika vadinama *elektromagnètine są́veika*. Elektros krūvis rodo elektromagnetinės sąveikos intensyvumą, panašiai kaip gravitacinė masė rodo gravitacinės sąveikos intensyvumą.

Pagal sąlygas krūviams judėti kūnų viduje visus kūnus skirstome į *laĩdininkus, dielèktrikus ir pùslaidininkius*. Laidininkai yra tokie kūnai, kurių viduje elektringosios dalelės (elektronai, jonai) gali laisvai slinkti. Prie jų priskiriame visus metalus, rūgščių, šarmų, druskų tirpalus, jonizuotas dujas. Laidininkai gerai praleidžia elektros srovę. Dielektrikuose elektronai pririšti prie tam tikrų erdvės taškų (pvz., atomų branduolių) ir gali tik šiek tiek pasislinkti šių taškų atžvilgiu. Dielektrikai yra stiklas, gintaras, kaučiukas, žėrutis, ebonitas, alyvos, nejonizuotos dujos. Jie nepraleidžia arba blogai praleidžia elektros srovę, todėl dažnai vadinami *izoliãtoriais*. Tarpinę padėtį tarp laidininkų ir dielektrikų užima didelė grupė medžiagų, vadinamų puslaidininkiais. Tipiški puslaidininkių pavyzdžiai yra silicis, germanis, selenas, teliūras.

Mūsų gyvenime kasdien gausėja greitai įsielektrinančių medžiagų – plastmasių, sintetikos, stiklo, popieriaus. Gaminiai iš tokių medžiagų judėdami, besitrindami įsielektrina, ir tuo labiau, kuo greičiau juda. Įsielektrina perpilami skysčiai, tarp jų ir degalai, skrendantys lėktuvai, greitai važiuojantys automobiliai, įsielektrina ir todėl kibirkščiuoja vyniojamas į ritinius polietilenas, popierius, šilkas, sintetiniai ir vilnoniai rūbai. Statinis įsielektrinimas trikdo technologinius procesus, kibirkščiavimas net gali sukelti avarijas, o rūbuose ir aplinkoje susikaupę krūviai nepalankiai veikia žmogaus savijautą.

Nepageidautinas kūnų įsielektrinimas technologiniuose gamybos procesuose šalinamas: įžeminamos mašinų dalys, kurios gali įsielektrinti, drėkinamas oras, kad būtų laidesnis elektrai, audiniai mirkomi specialiame antistatiniame skystyje ir kt.

Elektrostatiniai reiškiniai gali būti ir naudingi. Metaliniai paviršiai nudažomi geriau ir ekonomiškiau taikant elektrostatinį dažymą. Dažomoji detalė įelektrinama teigiamai, o purkštuvas – neigiamai, tada detalė pati pritraukia įsielektrinusius dažų lašelius.

Fabrikų dūmtraukiuose įrengiami elektrostatiniai filtrai. Kietos dūmų dalelės įelektrinamos ir prilimpa prie suodžių gaudytuvų.

Šiuo metu plačiai paplitęs brėžinių, grafikų ir spausdinto teksto greito dauginimo metodas – *elektrogrãfija*. Dauginamasis originalas fotografuojamas ant specialaus dielektriko sluoksnio. Susidaro neregimas atvaizdas, kuriame įprastą fotografijos patamsėjimą atstoja nevienodas statinis įsielektrinimas. Toks atvaizdas reljefiškai pritraukia specialius dažus, kuriuos perkėlus ant popieriaus ir gaunama originalo kopija.

Klausimai ir užduotys

1. Kokios sąveikos vadinamos elektromagnetinėmis?

2. Kas yra elementarusis krūvis?

3. Nors visi kūnai sudaryti iš elektronų ir protonų, mes praktiškai nejaučiame elektros jėgų veikimo. Kodėl?

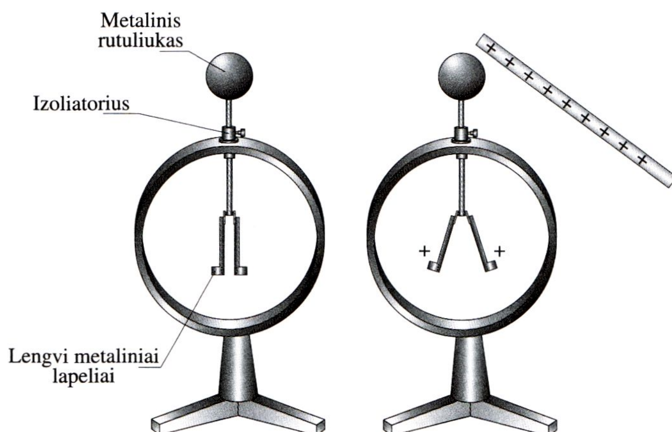
4. Išvardykite teigiamas elektringąsias daleles ir neigiamas elektringąsias elementariąsias daleles.

5. Pripūskite balioną ir patrinkite jį į sausus plaukus. Priliestas prie medinės sienos balionas prilimpa prie jos. Kodėl?

6. Kaip galima metalinį rutuliuką įelektrinti teigiamai, turint kitą, neigiamai įelektrintą, rutuliuką?

7. Mergaitei palietus ranka įelektrintą rutulį, jos plaukai pasistojo piestu. Paaiškinkite šį reiškinį.

8. 130 paveiksle parodytas elektroskopas – paprasčiausias prietaisas elektros krūviams matuoti. Metalinis rutuliukas užmautas ant elektrai laidaus strypelio, kurio antrajame gale, įleistame į stiklinį indą, pakabinti lengvi metaliniai lapeliai. Palietus rutuliuką įelektrinta lazdele ar tik priartinus ją prie elektroskopo, lapeliai prasiskečia. Paaiškinkite elektroskopo veikimą. Ar galima šiuo prietaisu ne tik nustatyti krūvio egzistavimą, bet ir apytiksliai išmatuoti jį?

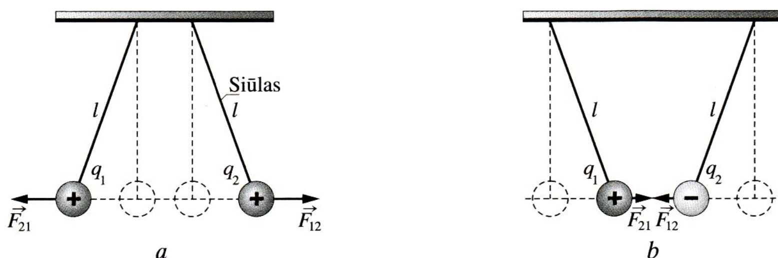


61. Pagrindinis elektrostatikos dėsnis – Kulono dėsnis

Bandymais nustatyta, kad kūnai, įelektrinti vienodo ženklo krūviais, stumia, o įelektrinti skirtingo ženklo krūviais – traukia vienas kitą. Kiekybiškai elektros krūvių tarpusavio veikimą ištyrė prancūzų mokslininkas Šarlis Ogiustenas Kulonas (*Coulomb*; 1736–1806), kuris 1785 m. pirmasis paskelbė pagrindinį įelektrintų kūnų sąveikos dėsnį (vadinamą Kulono dėsniu).

Jis naudojosi sukamosiomis svarstyklėmis, kurias sudaro ant plono metalinio siūlelio per vidurį pakabinta stiklinė arba ebonitinė lazdelė L (119 pav.). Ant vieno jos galo užmautas metalinis rutuliukas. Tokiame pat aukštyje netoli įtaisytas antras metalinis rutuliukas. Abu rutuliukus įelektrinus lygiais krūviais, tarp jų veikia stūmimo ar traukos jėga, ir lazdelė pasisuka, kartu užsukdama pakabinimo siūlelį. Jėgos didumas nustatomas iš siūlelio užsukimo kampo, kuris išmatuojamas, stebint veidrodėlio V pasisukimą. Keičiant rutuliukų elektros krūvių didumą arba nuotolį tarp jų, kinta ir užsukimo kampas. Iš šių bandymų Š. Kulonas suformulavo dėsnį, kuris teigia, kad **vakuume esančių taškinių krūvių elektrostatinės sąveikos jėgos dydis tiesiogiai proporcingas elektros krūvių sandaugai ir atvirkščiai proporcingas atstumo tarp jų kvadratui.** Matematiškai Kulono dėsnį užrašome taip:

$$F_{\text{vak}} = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2}. \quad (153)$$

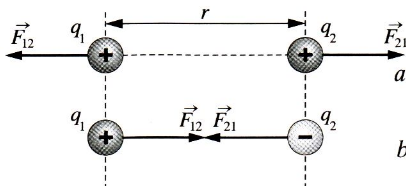


119 pav.

Proporcingumo koeficientas $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$, elektrinė konstanta $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ C/Nm^2.

Taip parašytas Kulono dėsnis tinka ir tolygiai įelektrintiems rutuliams; r – atstumas tarp jų centrų (120 pav.).

Krūvių sąveikos jėgos lygios, bet priešingų krypčių (pagal trečiąjį Niutono dėsnį). Jos nukreiptos išilgai tiesės, jungiančios krūvius: kai krūvių ženklai vienodi, $\vec{F}$ ir $\vec{r}$ kryptys yra vienodos (veikia kaip stūmos jėgos; 120 pav., *a*), kai jų ženklai skirtingi, $\vec{F}$ ir $\vec{r}$ – priešingų krypčių (veikia kaip traukos jėgos; 120 pav., *b*). Todėl stūmos jėgos vadinamos teigiamomis, o traukos jėgos – neigiamomis.



120 pav.

Kai taškiniai krūviai yra vienalyčiame dielektrike, jų sąveikos jėga yra ε kartų mažesnė už jų sąveikos jėgą vakuume, t. y.

$$F_{apl} = k\frac{|q_1||q_2|}{\varepsilon r^2}. \quad (154)$$

Taigi aplinkos santykinė dielektrinė skvarba parodo, kiek kartų sąveikos jėga tarp dviejų taškinių krūvių vakuume yra didesnė už sąveikos jėgą nagrinėjamoje aplinkoje:

$$\varepsilon = \frac{F_{vak}}{F_{apl}} > 1. \quad (155)$$

Kai kurių medžiagų santykinės dielektrinės skverbtys nurodytos 9 lentelėje.

9 lentelė

Medžiaga	t °C	ε
Oras	0	1,00590
Vanduo	0	88
Vanduo (distiliuotas)	20	81
Glicerinas	15	39,1
Transformatorinė alyva	20	2,24
Žėrutis	17–22	5,7–7
Parafinas	–	2–2,3
Stiklas	–	5–10

Kai kurios medžiagos tam tikruose temperatūros intervaluose pasižymi labai didelėmis santykinėmis dielektrinėmis skverbtimis. Pavyzdžiui, grupė mokslininkų, vadovaujama akad. I. Kurčatovo (1903–1960), nustatė, kad, esant temperatūrai –15 °C, segnetinės druskos ε = 6000 ir, esant temperatūrai 22,5 °C, jos ε = 4000. Rusų fizikas B. Vulas nustatė analogiškas bario titanato ($BaTiO_3$) savybes: pradedant kambario temperatūra ir iki 40 °C, jo ε = 1400, o, esant 80 °C, ε = 6600.

Krūvio matavimo vienetas yra *kulònas* (C); [q] = 1 C = 1 A · 1 s. Jo skaitinė vertė lygi krūviui, kurį perneša laidininko skerspjūviu vieno ampero stiprio srovė per 1 s.

Klausimai ir užduotys

1. Kuo panašus visuotinės traukos dėsnis į Kulono dėsnį ir kuo nuo jo skiriasi?

2. Palyginkite, kiek kartų dviejų elektronų elektrinės sąveikos jėga viršija jų visuotinės traukos jėgą. Ar priklausys šis santykis nuo atstumo tarp elektronų?

3. Kam lygus 1 kg masės aukso gabale esančių elektronų krūvis?

4. Nustatykite elektrono ir branduolio sąveikos jėgą vandenilio atome, kai atstumas tarp jų lygus 0,5 · 10^{-8} cm.

5. Ore yra du vienodi 1 g masės rutuliukai. Kokiu krūviu reikia įelektrinti kiekvieną rutuliuką, kad elektrinė stūmos jėga atsvertų gravitacinę jų tarpusavio traukos jėgą?

6. Du vienodai įelektrinti rutuliukai, kurių kiekvieno masė 0,5 g, kabantys ant viename taške pririštų 1 m ilgio siūlų, nutolsta vienas nuo kito per 4 cm. Koks kiekvieno rutuliuko krūvis?

62. Elektrinis laukas. Superpozicijos principas

Pagal anglų mokslininko M. Faradėjaus idėją, elektros krūviai tiesiogiai neveikia vienas kito. Aplink kiekvieną krūvį egzistuoja jo sukurtas elektrinis laukas. Vieno krūvio laukas veikia kitą krūvį ir atvirkščiai. Kuo toliau nuo krūvio, tuo laukas silpnesnis.

Remdamasis Faradėjaus idėjomis, Džeimsas Klarkas Maksvelas sugebėjo teoriškai įrodyti, kad elektromagnetinė sąveika turi plisti erdvėje baigtiniu greičiu.

Truputį pastūmus krūvį A (121 pav.), jėga, veikianti krūvį B, pakinta, bet ne tuo pačiu momentu, o tik po tam tikro laiko $t = \frac{AB}{c}$; čia AB – atstumas tarp krūvių, c – elektromagnetinės sąveikos plitimo greitis. Maksvelas įrodė, kad jis lygus šviesos greičiui tuštumoje, t. y. 300 000 km/s. Krūviui A pasislinkus, elektrinis laukas aplink krūvį B pakinta praėjus laikui t. Vadinasi, tarp krūvių tuštumoje vyksta tam tikras procesas, dėl kurio sąveika tarp krūvių plinta baigtiniu greičiu.

121 pav.

Erdvėje tarp sąveikaujančių kūnų tam tikrą laiką vykstantis procesas yra svarbiausias veiksnys, skiriantis artiveikos teoriją nuo toliveikos teorijos. Visi kiti argumentai, taikomi vienai ar kitai teorijai, negali būti lemiami.

Šiandien gerai žinome, kad elektrinis laukas iš tikrųjų yra. Jo savybes galima tirti bandymais. Tačiau neįmanoma pasakyti, iš ko tas laukas sudarytas. Čia susiduriama su žinomybės riba moksle.

Apie elektrinio lauko kilmę galime pasakyti visų pirma tai, kad laukas yra materialus: jis egzistuoja nepriklausomai nuo mūsų žinių apie jį; antra – jis turi tam tikrų savybių, kurios neleidžia jo supainioti su kuo nors kitu aplinkoje.

Tirdami elektrinį lauką, susiduriame su ypatingos formos materija, kurios judėjimas nepaklūsta Niutono mechanikos dėsniams. Atradus elektrinį lauką, pirmą kartą visoje mokslo istorijoje kilo savita idėja, kad egzistuoja įvairių rūšių materija ir kiekvienai jų būdingi savi dėsniai.

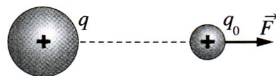
Svarbiausia elektrinio lauko savybė – veikti elektros krūvius tam tikra jėga. Pagal krūvio veikimą nustatomas elektrinis laukas, jo pasiskirstymas erdvėje ir nagrinėjamos visos jo charakteristikos.

Elektrodinamikos skyriuje susipažinsime su naujomis elektrinio lauko savybėmis, aptarsime ir kintamąjį elektrinį lauką, kuris tiesiogiai nėra susijęs su krūviais. Dauguma statinių ir kintamųjų laukų savybių sutampa, tačiau tarp jų yra ir esminių skirtumų.

Elektros krūvis sukuria apie save elektrinį lauką ir pakeičia aplinkos savybes. Nejudančių elektros krūvių sukurtas elektrinis laukas vadinamas *elektrostãtiniu laukù*. Jis, laikui bėgant, nekinta. Elektrostatinį lauką sukuria tik elektros krūviai. Jis yra erdvėje, supančioje tuos krūvius, ir tampriai su jais susijęs.

Pagrindinė elektrostatinio lauko charakteristika yra **elektrìnio laũko stìpris** $\vec{E}$. **Šio vektorinio dydžio skaitinė vertė lygi jėgos, kuria laukas veikia nejudantį taškinį krūvį, ir to krūvio santykiui:**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \qquad (156),$$



čia q_0 – bandomasis krūvis krūvio q sukurtame elektrostatiniame lauke (122 pav.).

122 pav.

Pakeitus krūvio q_0 ženklą, pakinta ir $\vec{F}$ kryptis. Vadinasi, **elektrostatinio lauko stipris nepriklauso nei nuo q_0 dydžio, nei nuo jo ženklo ir yra krūvio q sukurto lauko jėginė charakteristika.** Jo matavimo vienetas yra $|E| = \frac{\text{N}}{\text{C}} = \frac{\text{V}}{\text{m}}$.

Taškinio krūvio sukurto elektrostatinio lauko stipris

$$E = k\frac{q}{\varepsilon r^2}. \tag{157}$$

Iš formulės matyti, kad **taškinio krūvio sukurto elektrinio lauko stipris yra tiesiogiai proporcingas krūvio didumui ir atvirkščiai proporcingas atstumo nuo krūvio iki nagrinėjamo lauko taško kvadratui.** Be to, elektrostatinio lauko stipris aplinkoje yra ε kartų mažesnis už lauko stiprį vakuume. (157) lygtis netinka taškui, kai $r = 0$, kadangi jo atžvilgiu taškinis krūvis nėra taškinis.

Kai lauką kuria daug taškinių krūvių, galioja laukų superpozicijos principas: **atstojamojo lauko stipris lygus atskirų krūvių sukurtų laukų stiprių vektorinei sumai:**

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + ... + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i.$$

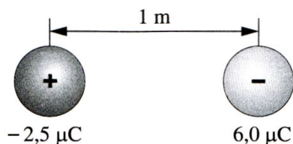
Šį principą patogu taikyti netaškiniams krūviams, mintyse išskaidžius juos į taškinius ir sumuojant jų atitinkamas komponentes.

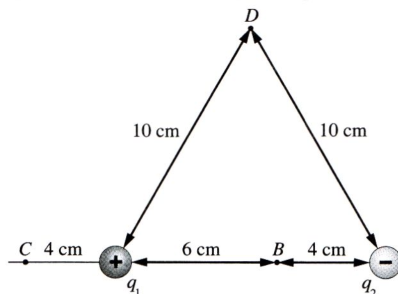
Klausimai ir užduotys

1. Išvardykite elektrostatinio lauko savybes.

2. Kaip nukreiptas krūvio q_0 lauko stipris, kai $q_0 > 0$? Kai $q_0 < 0$?

3. Dviejų priešingo ženklo krūvių sukurtas elektrinis laukas gali kai kuriose vietose būti lygus nuliui, nes vieno ir kito krūvių laukai naikina vienas kitą. Suraskite bent vieną tokį tašką dviejų krūvių sistemai, pavaizduotai kairiajame paveiksle.





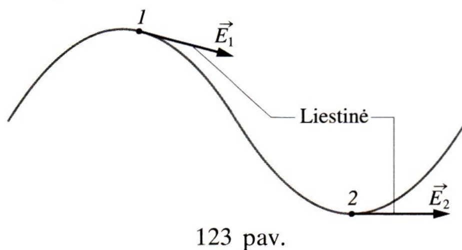
4. Dešiniajame paveiksle taškiniai krūviai +2 nC ir –2 nC yra 10 cm atstumu vienas nuo kito. Apskaičiuokite jų sukurto elektrostatinio lauko stiprį *B*, *C* ir *D* taškuose.

5. Kokia aplinka gaubia taškinį $4{,}5 \cdot 10^{-7}$ C elektros krūvį, jeigu 5 cm atstumu nuo jo lauko stipris lygus $2 \cdot 10^4$ N/C? Apskaičiuokite tos aplinkos absoliučiąją dielektrinę skvarbą.

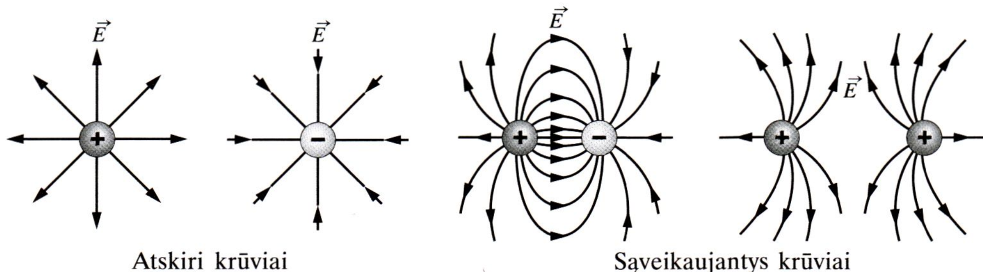
6. Elektronas, patekęs į vienalytį elektrinį lauką vakuume, juda lauko stiprio linijų kryptimi. Per kiek laiko jo greitis sumažės iki nulio, jeigu pradinis greitis lygus $1{,}8 \cdot 10^3$ km/s, o lauko stipris 90 N/C?

63. Elektrinio lauko jėgų linijos. Vienalytis elektrinis laukas

Elektrostatinį lauką galima pavaizduoti grafiškai – tuo tikslu brėžiamos *elektrìnio laũko stìprio vèktoriaus* $\vec{E}$ (arba elektrinio lauko jėgų) *lìnijos*. **Jėgų̃ lìnija vadinama tokia įsivaizduojama linija, kurios liestinė bet kuriame linijos taške sutampa su lauko stiprio vektoriaus $\vec{E}$ kryptimi** (123 pav.).

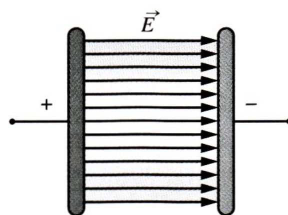


123 pav.



124 pav.

Elektrostatinio lauko jėgų linijos prasideda teigiamuose krūviuose, o baigiasi neigiamuose krūviuose (124 pav.). Jėgų linijos nesikerta, nes vektorius $\vec{E}$ bet kuriame lauko taške nukreiptas viena kryptimi. Kur elektrinio lauko jėgų linijos tankesnės, ten laukas stipresnis. **Elektrostatinis laukas, kurio jėgų linijos yra lygiagrečios ir vienodo tankio, vadinamas vienalyčiù; jo stipris bet kuriame taške yra pastovus ($\vec{E}$ = const).** Tokį elektrinį lauką sukuria, pavyzdžiui, dvi lygiagrečios metalinės plokštelės, kurioms suteikti skirtingo ženklo krūviai (125 pav.). Šio lauko stipris $\vec{E}$ lygus kiekvienos plokštelės sukurtų laukų stiprių vektorinei sumai: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.



125 pav.

Kadangi laukų kryptys vienodos, tai atstojamojo lauko stiprio didumas lygus laukų stiprių didumų sumai:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{|q|}{2\varepsilon_0 S} + \frac{|q|}{2\varepsilon_0 S} = \frac{|q|}{\varepsilon_0 S} \quad \text{arba} \quad E = E_1 + E_2 = \frac{|\sigma|}{2\varepsilon_0} + \frac{|\sigma|}{2\varepsilon_0} = \frac{|\sigma|}{\varepsilon_0}, \tag{158}$$

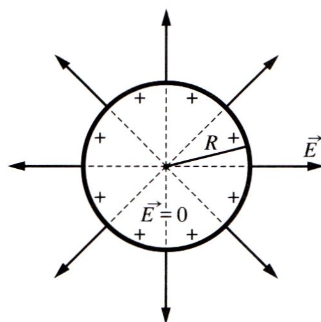
t. y. jis nepriklauso nuo atstumo tarp plokštelių. Narys $\sigma = \frac{q}{S}$ yra *paviršìnio krū̃vio tañkis*. **Paviršìnio krū̃vio tankiù vadinamas krūvio ir paviršiaus ploto, kuriame jis pasiskirstęs, santykis.** SI vienetų sistemoje paviršinio krūvio tankis matuojamas taip: $|\sigma| = \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}$.

Nustatyta, kad vektoriaus $\vec{E}$ linijų skaičius dielektrike yra ε kartų mažesnis negu vakuume.

Tolygiai įelektrinta R spindulio sfera (arba rutulys) sukuria elektrostatinį lauką, kurio stipris atstumu $r \geq R$ apskaičiuojamas ir grafiškai atvaizduojamas taip pat, kaip

ir taškinio krūvio, lygaus sferos arba rutulio krūviui, esančiam jų centre: $E = k\dfrac{4\pi\sigma R^2}{r^2}$.

Taip įelektrintos sferos (rutulio) viduje elektrinio lauko stipris lygus nuliui (126 pav.).



126 pav.

Susikaupę krūviai (panašiai kaip dujos) sudaro didelį „elektrostatinį slėgį“. Iš mechanikos kurso žinome, kad ylos smaigalyje nedidele jėga galima sudaryti milžinišką slėgį ir pradurti kietą kartoną. Analogiškai įelektrinto kūno smaigalyje gali susikaupti toks tankus krūvis, kad jis pradės nutekėti ir tamsoje susidarys gerai matomas švytintis „elektrinis vėjas“, galintis užpūsti žvakės liepsną arba sukti „elektrostatinį variklį“.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname elektrinio lauko jėgų linijomis?

2. Ar visada elektringosios dalelės trajektorija sutampa su jėgų linija?

3. Ar gali jėgų linijos susikirsti?

4. Kam lygus įelektrinto laidaus rutulio lauko stipris?

5. Kokiu atstumu nuo taškinio 10^{-8} C krūvio, patalpinto distiliuotame vandenyje, elektrinio lauko stipris lygus 0,25 V/m?

6. Lauko stiprį $\vec{E}$ rutulio paviršiuje išreikškite paviršinio krūvio tankiu σ. Ar galima pagal gautą formulę apskaičiuoti laidininko, kurį riboja plokščias paviršius, kuriamo lauko stiprį?

7. Kokio stiprio elektrinį lauką reikia sudaryti vakuume, kad nejudėjęs elektronas jame įgytų $2 \cdot 10^{12}$ m/s² pagreitį? Per kiek laiko elektrono greitis padidės iki $5 \cdot 10^6$ m/s?

8. Dviejose lygiakraščio trikampio, kurio kraštinės ilgis 2 m, viršūnėse yra vienodo didumo $1{,}8 \cdot 10^{-18}$ C, bet skirtingo ženklo elektros krūviai. Apskaičiuokite elektrinio lauko stiprį trečioje šio trikampio viršūnėje.

9. Elektriniame lauke, kurio stipris 120 V/m, jėgų linijų kryptimi juda elektronas. Kokį atstumą nulėks elektronas, kol sustos, jei pradinis jo greitis buvo 1000 km/s? Kiek laiko truks elektrono stabdymas? Elektrono krūvio ir masės santykis lygus $e/m = 1{,}758 \cdot 10^{11}$ C/kg.

10. Rutuliukas, kurio spindulys R, įelektrintas krūviu q ir panardintas į alyvą tarp dviejų lygiagrečių plokščių. Rutuliuko medžiagos tankis ρ_1, alyvos – ρ_2. Kam lygus elektrostatinio lauko stipris, kai rutuliukas nejuda?

11. Taškiniai krūviai $|q_1| = |q_2| = 3n\ C$ yra xOy plokštumoje. Jų koordinatės: $x_1 = 3$ cm, $y_1 = 0$ cm ir $x_2 = 2$ cm, $y_2 = 0$ cm. Apskaičiuokite elektrostatinio lauko stiprį taške A, kurio koordinatės yra $x_A = 0$ cm ir $y_A = 4$ cm.

12. Metalinis rutulys įelektrinamas daug kartų jį vienodai suliečiant su metaline plokšte, kuri po kiekvieno sulietimo įelektrinama iki pastovaus krūvio Q. Apskaičiuokite maksimalų rutulio krūvį, jei po pirmojo sulietimo su plokšte jis buvo lygus q_1.

64. Laidininkų ir dielektrikų savybės

Jeigu bandysime įelektrinti rankoje laikomą metalinę lazdelę ar strypelį, trindami juos kailio arba šilko gabalėliu, pastebėsime, kad jie neįsielektrina. Juos galėsime įelektrinti tik laikydami už stiklo arba ebonito rankenėlės. Perbraukę ranka per įelektrintą stiklinę arba ebonitinę lazdelę, ją išelektriname. Taigi nei rankoje laikoma metalinė lazdelė, nei ranka perbraukta įelektrinta stiklo arba ebonito lazdelės nepajėgia likti įelektrintos, nes jomis elektra nuteka į žemę. Elektriniai krūviai, veikiami elektrinio lauko, vienuose kūnuose, pvz., metaluose, grafite, druskų, rūgščių ir šarmų tirpaluose, jonizuotose dujose, gali laisvai judėti, o kituose, pvz., stikle, gintare ir kt., negali, nes yra tvirtai „pririšti" prie atomų. Todėl pirmuosius kūnus, **turinčius daug laisvų elektringųjų dalelių, vadiname laĩdininkais**, o antruosius kūnus, kuriuose **beveik nėra laisvų elektringųjų dalelių, galinčių perduoti elektros krūvį, vadiname dielèktrikais, arba izoliãtoriais.**

Gamtoje nėra nei absoliučių laidininkų, nei absoliučių dielektrikų. Kiekvienas kūnas yra daugiau ar mažiau laidus elektrai. Todėl neįmanoma kūnų griežtai suskirstyti į laidininkus ir dielektrikus. Geriausi laidininkai yra metalai, iš kurių pažymėtini auksas, sidabras, varis. Geriausi dielektrikai – gintaras, kvarcas, žėrutis, ebonitas ir visos normalaus būvio dujos. Šias dvi medžiagų grupes jungia *pùslaidininkiai*, kurių elektrinis laidumas nėra didelis, bet ženkliai didesnis už dielektrikų elektrinį laidumą. Puslaidininkinėms medžiagoms priklauso selenas, germanis, indis, arsenas ir kt. *Vienintelis absoliutus dielektrikas, arba izoliatorius, yra vakuumas.*

Elektros krūvių judėjimą, arba elektros srovę, laidininkuose sukelia laisvų elektros krūvių judėjimas. Didžiausiu elektriniu laidumu pasižymi metalai. Bandymais nustatyta, kad metaluose juda tik neigiamieji krūvininkai, o teigiamieji yra surišti su atomų branduoliais ir pasilieka nejudami. Neigiamieji krūvininkai metaluose yra vadinamieji *laisvíeji elektrònai*, kurie, veikiami ir pačios mažiausios elektrinės jėgos, juda tos jėgos kryptimi.

Kai metalą įelektriname teigiamai, iš jo pašaliname dalį laisvųjų elektronų, ir metale susidaro teigiamųjų krūvininkų perteklius. Įelektrinant jį neigiamai, susidaro laisvųjų elektronų perteklius.

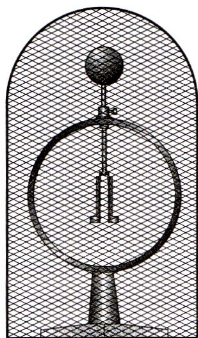
Metaluose elektros krūviai yra pusiausviri tik tada, kai jų neveikia jokia elektrinė jėga, t. y. kai išorinio elektrinio lauko stipris lygus nuliui. Jeigu nėra išorinio elektrinio lauko, tai elektronai laidininko viduje juda chaotiškai ir jų judėjimo intensyvumas priklauso nuo temperatūros, kaip ir dujų molekulių.

Įelektrinto metalinio kūno perteklinis teigiamas arba neigiamas elektros krūvis, veikiamas kuloninės stūmimo jėgos, pasiskirsto kūno paviršiuje, sudarydamas aukštą potencialą (žr. §65 ir §66), kuris sulaiko laisvuosius metalo elektronus ir neleidžia jiems praeiti panašiai, kaip indo sienelės sulaiko dujų molekules.

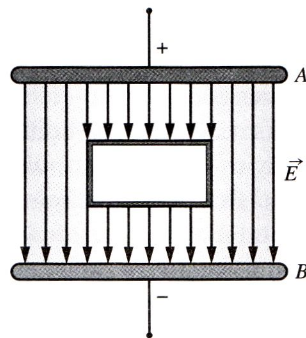
Įelektrinto metalinio kūno elektros krūvis bus pusiausviras tik tuo atveju, kai jo viduje elektrinio lauko stipris bus lygus nuliui, o paviršiuje jis bus statmenas kūno paviršiui. Priešingu atveju laisvieji elektronai judės elektrinio lauko veikiami ir pasiskirstys taip, kad būtų tenkinama minėtoji sąlyga. Galime daryti išvadą, kad, esant elektro-

statinei pusiausvyrai, laidininko viduje elektrinio lauko stipris lygus nuliui $(\vec{E}=0)$. Iš to išplaukia, kad laidininko viduje potencialas yra visur vienodas ir jo paviršius yra ekvipotencialinis (žr. §66 ir §67).

Kai laidininko viduje elektrinio lauko stipris lygus nuliui, elektrinio lauko jėgų linijos į metalo vidų neįeina ir pasibaigia jo paviršiuje, statmenai tam paviršiui. Tai būdinga ne tik vientisam, bet ir tuščiaviduriam metaliniam kūnui. Kad taip iš tikrųjų yra, įsitikinkite paėmę įelektrintą elektroskopą ir apgaubę jį tankiu metaliniu tinkleliu (127 pav.). Matysite, kaip elektroskopo lapeliai susiglaudžia. Tinklelinį gaubtą nukėlus, jie prasiskleidžia. Ši laidininkų savybė taikoma jautriai elektrinei aparatūrai apsaugoti nuo išorinių elektrinių laukų ir vadinama *ekranävimu*. Kadangi pašaliniai elektriniai laukai trukdo elektroninės aparatūros darbui, iškraipo tikslių matavimo prietaisų parodymus, todėl jautrūs išoriniams elektriniams laukams prietaisai dedami į metalinius korpusus arba apgaubiami įžemintais vieliniais tinkleliais, pro kuriuos pašaliniai laukai nepatenka į aparatūros vidų, nes trikdančio išorinio elektrinio lauko jėgų linijos pasibaigia dėžės arba tinklo paviršiuje.




127 pav.



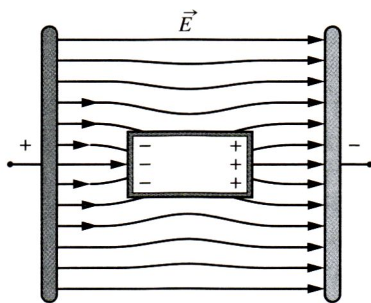
128 pav.

128 paveiksle parodyta elektrinio lauko jėgų linijų kryptis tarp dviejų įelektrintų plokštelių A ir B, į kurių vidų įdėta tuščiavidurė dėžė. Jėgų linijos į dėžės vidų neįeina (jos prasideda ir baigiasi laidininko paviršiuje), todėl elektros krūviai susikaupia dėžės paviršiuje, o jos viduje elektros krūvių nėra. Patikrinimui atlikime tokį bandymą. Įelektrinkime tuščiavidurį metalinį rutulį, turintį nedidelę skylutę, ir palieskime bandomuoju izoliuotu metaliniu rutuliuku jo išorinį paviršių. Bandomasis rutuliukas įsielektrina, nes, juo palietus elektroskopą, pastarojo lapeliai prasiskiria. Paskui, įkišę vidun pro skylutę bandomąjį rutuliuką, palieskime juo tuščiavidurio rutulio vidinį paviršių. Rutuliukas neįsielektrina, nes, palietus juo elektroskopą, lapeliai neprasiskiria ir lieka susiglaudę.

Jeigu neįelektrintu rutuliuku paliečiame izoliuoto (neįelektrinto) tuščiavidurio rutulio išorinį paviršių, tai tik maža rutuliuko krūvio dalis pasiskirsto rutulio paviršiuje ir jis lieka dar šiek tiek įelektrintas. Tačiau, palietus įelektrintu rutuliuku vidinį rutulio paviršių, rutuliukas išsielektrina. Tas pats atsitiktų, jeigu elektroskopą įdėtume į uždarą metalinio tinklo dėžę: jo lapeliai neprasiskirtų, nes elektroskopas neturi jokio elektros krūvio.



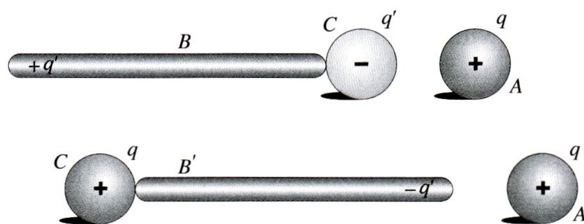
129 pav.



130 pav.

Bandymą pakartokime kiek kitaip: artindami įelektrintą kūną, pvz., stiklinį arba ebonitinį rutuliuką (lazdelę), prie elektroskopo (129 pav.), pastebėsime, kad pastarojo lapeliai prasiskiria, o, nutolinus minėtus kūnus, elektroskopo lapeliai vėl susiglaudžia. Apibendrindami galime teigti, kad, priartinus neįelektrintą metalinį kūną (laidininką) prie įelektrinto kūno, kurio krūvis $+q$, pirmasis įsielektrina. Atkreiptoje į įelektrintą kūną pusėje atsiranda priešingo ženklo $(-q)$ elektros krūvis, o nutolusioje pusėje – to paties ženklo $(+q)$ elektros krūvis (130 pav.). Nutolinus kūną, jo elektros krūvis pranyksta. Šį reiškinį vadiname *elektrostãtine indùkcija*, o tokiu būdu gaunamus elektros krūvius – *indukúotaisiais krū̃viais*.

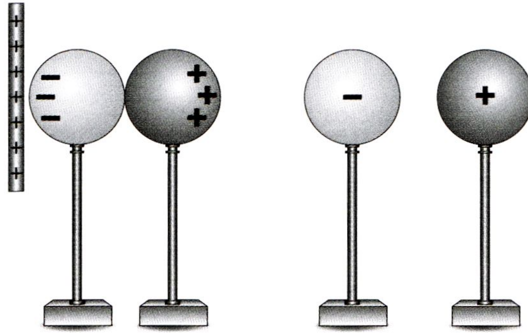
Prie teigiamai įelektrinto metalinio rutulio A (131 pav.) priartinkime izoliuotą metalinį cilindrą B. Jo galuose susitelks indukuotieji elektros krūviai. Artimiausią rutuliui A cilindro galą palieskime izoliuotu metaliniu rutuliuku C taip, kad jis su cilindru B sudarytų vientisą paviršių. Tada indukuotas neigiamas elektros krūvis susikaups rutuliuke. Šiuo rutuliuku palietę elektroskopą, įsitikinsime, kad jis įelektrintas neigiamai. Analogiškai galime įsitikinti, kad nutolusiame cilindro gale indukuojamas teigiamas elektros krūvis.



131 pav.

Jeigu nutolusį cilindro B galą įžeminsime, tai jame susikaupęs teigiamas elektros krūvis nutekės į žemę. Atjungus įžeminimą, cilindre pasiskirstys neigiamo krūvio perteklius. Pritaikius elektrostatinę indukciją, elektros krūvius galima perskirti elektroforu, indukcijos arba elektroforine mašina ir kt.

Elektriniame lauke sulietus du laidininkus ir vėl juos atskyrus (laukas nustoja veikti), indukuotieji krūviai negali neutralizuotis ir abu laidininkai lieka įelektrinti priešingais krūviais (132 pav.).



132 pav.

Indukcijos būdu įelektrinant kūnus, tenka sunaudoti energijos, kadangi, atskiriant įelektrintus kūnus ir įelektrintą kūną ištraukiant iš lauko, reikia įveikti elektrostatinių jėgų pasipriešinimą – taigi atlikti darbą.

Debesys gali įsielektrinti juose judant orui ir vandens lašeliams. Tarp žemės ir įsielektrinusių debesų susikuria stiprus elektrinis laukas, dėl ko įvyksta *atmosfèros kibirkštìnis ìšlydis*, vadinamas *žaibù*. Apsaugai nuo jo įrengiamas *žaibólaidis*. Žaibolaidis – tai metalinis gerai įžemintas stiebas, statomas šalia arba virš saugomo objekto.

Žaibolaidį išrado ir žaibo elektrinę kilmę įrodė amerikiečių fizikas Bendžaminas Franklinas (*Franklin*; 1706–1790).

Dielektrikais vadinamos elektrai nelaidžios medžiagos, sudarytos iš molekulių (amorfinės medžiagos) arba iš jonų bei atomų (joniniai ir kovalentiniai kristalai), kuriuose nėra laisvųjų elektros krūvininkų. Kietuose dielektrikuose krūvininkai (jonai, atomai bei molekulės) dėl atominių arba molekulinių jėgų svyruoja apie tam tikras pusiausvyros padėtis. Skystuose ir dujiniuose dielektrikuose molekulės nėra standžiai „pririštos“ prie tam tikrų vietų ir gali daugiau ar mažiau laisvai judėti.

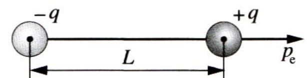
Nagrinėjant dielektrikų savybes, dažnai susiduriame su *elektriniù dipoliù*, kurį sudaro du lygūs priešingo ženklo krūviai q, nutolę vienas nuo kito atstumu L. Dipoliais gali būti laikomi ir dielektrikų atomai bei molekulės.

Reiškinys, kai į elektrinį lauką įneštų dielektrikų galuose atsiranda teigiami ir neigiami krūviai, vadinamas dielèktrikų poliarizãcija.

Pagrindinė kiekvieno dipolio charakteristika yra dipolio *elektrìnis momeñtas* $\vec{p}_e$, kurio skaitinė vertė yra lygi teigiamojo krūvio q ir atstumo tarp krūvių L sandaugai:

$$p_e = qL. \tag{159}$$

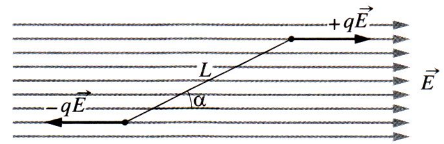
Dipolio elektrinis momentas $\vec{p}_e$ – vektorinis dydis, kurio kryptis nukreipta išilgai dipolio ašies L nuo neigiamojo krūvio į teigiamąjį (133 pav.). Atstumas $\vec{L}$ – taip pat vektorinis dydis, nukreiptas nuo neigiamojo krūvio į teigiamąjį, ir vadinamas dipolio petimi. $\vec{p}_e$ ir $\vec{L}$ kryptys sutampa.



133 pav.

Įneškime elektrinį dipolį į vienalytį elektrinį lauką, kurio visuose taškuose elektrinio lauko stipris $\vec{E}$ yra vienodas (toks laukas vaizduojamas lygiagrečiomis tiesiomis

jėgų linijomis; 134 pav.). Kampą tarp dipolio ašies ir lauko krypties pažymėkime α. Abu dipolio krūvius veikia lygiagrečios, bet priešingų krypčių jėgos $\vec{F} = q\vec{E}$, sukuriančios jėgos arba sukimo momentą *M*, kuris stengiasi pasukti dipolį taip, kad jo ašis eitų išilgai lauko jėgų linijos. Remiantis mechanikos kurso (§18) žiniomis apie jėgos momentą, dipolio krūvius veikiantį jėgų sukimo momentą galima užrašyti taip: $M = qEL \sin\alpha$. Šioje lygtyje narį qL pakeitę p_e (pagal 159 formulę), gauname:



134 pav.

$$M = p_e E \sin\alpha. \quad (160)$$

Iš šios lygties matome, kad **krūvius veikiantis jėgų sukimo momentas lygus dipolio elektrinio momento, elektrinio lauko stiprio ir kampo α tarp jų sinuso sandaugai ir kreipia dipolį elektrinio lauko kryptimi.**

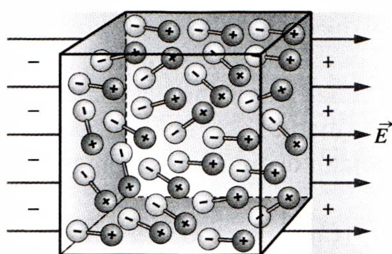
Įnešus elektrinį dipolį į nevienalytį elektrinį lauką, jį taip pat veikia jėgų sukimo momentas, kuris kreipia dipolį elektrinio lauko kryptimi. Tokiame nevienalyčiame lauke dipolio krūvius veikia nevienodo dydžio ir priešingų krypčių jėgos, todėl dipolis ne tik sukamas, bet ir verčiamas slinkti stipresniojo elektrinio lauko pusėn. Dipolio elektriniai laukai susideda, ir atstojamojo elektrinio lauko stipris dielektrike nebebus lygus nuliui. Tai ir yra dielektriko poliarizacijos reiškinio esmė, kurią pirmasis paaiškino vokiečių fizikas Francas Epinusas (1724–1802), dirbęs ir gyvenęs Peterburge. *Poliarizuoto dielektriko elektrinis laukas visada yra priešingos išoriniam elektriniam laukui krypties, todėl dielektriko viduje elektrinis laukas silpnėja.* **Medžiagos savybę poliarizuotis ir susilpninti elektrinį lauką dielektrike apsprendžia dielèktrinė skvarbà ε.**

Dielektrikus skirstome į *pòlinius ir nepòlinius*. **Polinius dielektrikus sudaro polinės molekulės, kuriose elektrinių dipolių krūviai taip orientuoti, kad jų centrai nesutampa.** Tokios molekulės turi nuolatinį dipolio elektrinį momentą ($p_e = qL$). Nesant elektrinio lauko, jose dipoliai išsidėsto netvarkingai ir jų elektriniai momentai yra orientuoti įvairiomis kryptimis. Šios kryptys chaotiškai keičiasi dėl šiluminio molekulių judėjimo. Todėl visų molekulių, esančių bet kuriame dielektriko tūryje, atstojamasis dipolių elektrinis momentas lygus nuliui. Poliniams dielektrikams priklauso vanduo, eteris, amoniakas, daugelis organinių medžiagų.

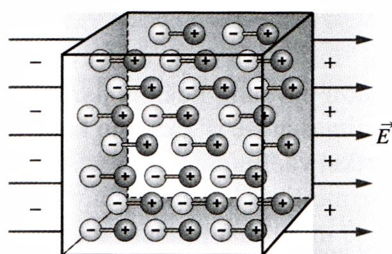
Įnešus polinį dielektriką, kurio dipoliai yra kietieji (jų elektriniai momentai yra pastovaus didumo), į elektrinį lauką, jų polinės molekulės stengiasi pasisukti taip, kad dipolių momentų vektorių $\vec{p}_e$ kryptys sutaptų su elektrinio lauko stiprio vektoriaus $\vec{E}$ kryptimi. Tiksliai sutapti trukdo netvarkingas šiluminis molekulių judėjimas (135 pav.).

Dėl šių priežasčių dielektriko dipolio momentai orientuojasi išilgai elektrinio lauko. Ši orientacija tuo ženklesnė, kuo stipresnis išorinis elektrinis laukas ir kuo silpnesnis molekulių šiluminis judėjimas, t. y. kuo žemesnė temperatūra.

Kai dielektrikų molekulės yra minkštieji dipoliai (turi nepastovaus didumo elektrinius momentus), tai elektriniame lauke jos ne tik orientuojamos, bet ir deformuojamos, nes elektriniai krūviai pasislenka molekulių viduje. Šiuo atveju molekulių dipolių momentai padidėja – tai vadinama *jònine poliarizãcija*.



135 pav.



136 pav.

Poliarizuotieji krūviai negali judėti, jie nei nuteka į žemę, nei atskiriami vieni nuo kitų dalijant dielektriką į dalis (visai kitaip elgiasi indukuotieji krūviai laidininkuose), todėl vadinami *surištaĩsiais krū̃viais*.

Nepolinius dielektrikus sudaro nepolinės molekulės, kurių teigiamųjų ir neigiamųjų krūvių centrai sutampa. Jeigu erdvėje nėra išorinio elektrinio lauko, tai nepolinės molekulės nesudaro dipolių ir neturi elektrinio dipolio momento. Kai nepolinį dielektriką įnešame į elektrinį lauką, tai jo veikiamos molekulės deformuojasi ir jų elektros krūviai pasislenka iš pusiausvyros padėties: teigiamieji krūviai elektrinio lauko kryptimi, o neigiamieji – priešinga elektrinio lauko krypčiai. Dabar molekulės teigiamojo krūvio centras jau nesutampa su neigiamųjų krūvių centru ir tarp jų susidaro nedidelis atstumas L. Nepolinių dielektrikų molekulės elektriniame lauke virsta dipoliais ir įgyja dipolių momentus. Akivaizdu, kad elektrinis laukas deformuoja molekulių elektronų orbitas. Dipoliai ištįsta proporcingai elektrinio lauko stipriui. Taip susidarę molekulių dipolių elektriniai momentai vadinami *indukúotaisiais dipòlių momeñtais*. Jie būna tol, kol veikia išorinis elektrinis laukas, nes šiluminis judėjimas nepajėgia suardyti dielektriko poliarizacijos (136 pav.). Tokia nepolinio dielektriko poliarizacija vadinama *elektrònine poliarizãcija*. Jeigu elektrinis laukas – kintamasis, jame esančių dielektrikų dipolių ilgis taip pat periodiškai kinta, todėl dielektrikai įkaista. Šis reiškinys taikomas dielektrinėms medžiagoms kaitinti ir džiovinti.

Visais vienalyčių dielektrikų poliarizacijos atvejais elektriniame lauke atsiranda tik paviršìniai krū̃viai. Dielektriko viduje dipoliai yra nukreipti priešingo ženklo krūviais vienas prieš kitą ir kompensuoja vienas kito veikimą.

Kai stiprus išorinis elektrinis laukas nutrauks ryšius tarp dipolio krūvių, tai dielektrike atsiras laisvųjų krūvininkų ir įvyks *kibirkštìnė ìškrova – dielèktriko pramušìmas*. Tokia kibirkštis ardo dielektriką. Todėl bent kartą pramuštas dielektrikas praranda izoliacines savybes ir tampa pavojingu elektros įrenginio elementu.

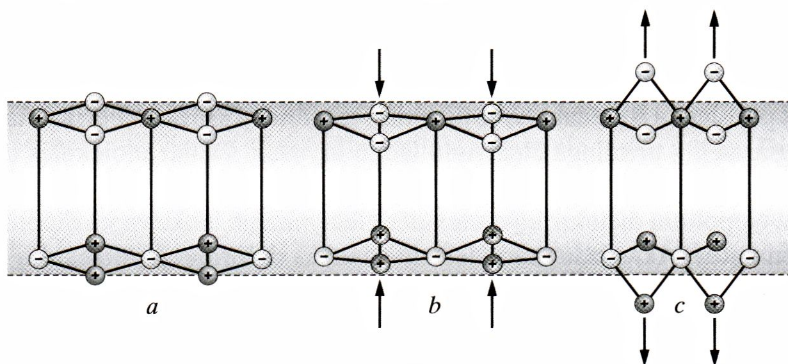
Elektrinio lauko stipris $\vec{E}_{pr}$, kurį pasiekus dielektrikas pramušamas, vadinamas pramušìmo stipriù, o jį atitinkanti įtampa U_{pr} – pramušìmo įtampa. Dielektriko storį pažymėjus d, pramušimo įtampa bus išreiškiama lygtimi

$$U_{pr} = E_{pr} d. \tag{161}$$

Patikimam elektros įrenginių darbui užtikrinti dielektriką veikianti įtampa neturi viršyti leistinosios įtampos, kuri nustatoma 3–5 kartus žemesnė už pramušimo įtampą.

Kai išorinis elektrinis laukas nustoja veikti, tai dielektrikai išsielektrina – *depoliarizúojasi*. Tačiau yra tokių dielektrikų (pvz., vaškas, parafinas, žėrutis ir kt.), kurie, specialiu būdu paveikti, lieka poliarizuoti ir nustojus veikti išoriniam elektriniam laukui. Įelektrinimas juose išlieka nuo kelių dienų iki keleto metų. Tokie **stabiliai poliarizuoti dielektrikai vadinami elektrètais.** Elektretai naudojami dozimetrų, barometrų, higrometrų, atminties elementų gamyboje.

1880 m. broliai prancūzai Pjeras ir Polis Kiuri (*Curie*) atrado, jog kai kurie tempiami ir slegiami kristalai įsielektrina – ant jų sienelių atsiranda elektros krūviai. Šis reiškinys buvo pavadintas **pjezoelektriniù réiškiniu**, o tokiu būdu gauta elektra – **pjezoelektrà.** Atlikti eksperimentai parodė, kad, kristalus deformuojant, gaunamas elektros kiekis yra proporcingas deformacijai, o krūvio ženklas priklauso nuo deformacijos pobūdžio (137 pav., *a*, *b* ir *c*). Pjezoelektrinėmis savybėmis pasižymi tokios kristalinės medžiagos, kaip antai: kvarcas, turmalinas, segnetinė druska ir kt.



137 pav.

Kiek vėliau broliai Kiuri pastebėjo kvarce ir atvirkštinį pjezoelektrinį reiškinį. Kvarco kristalas, patalpintas atitinkama kryptimi į elektrinį lauką, ilgėja arba trumpėja (deformuojasi) priklausomai nuo išorinio elektrinio lauko krypties. Kuo elektrinis laukas stipresnis, tuo didesnė deformacija. Atvirkštinį pjezoelektrinį reiškinį vadiname **elektrostrìkcija.** Ypač didele elektrostrikcija pasižymi pjezoelektriniai kristalai, pvz., kvarcas, segnetinė druska ir kt. Tinkamu būdu iš kvarco kristalo išpjauta plokštelė kintamajame elektriniame lauke virpa ir sukelia ore arba skystyje garso arba ultragarso bangas. Dėl gebėjimo keisti mechaninius virpesius elektriniais ir atvirkščiai tokie kristalai naudojami mikrofonuose, adapteriuose, deformacijų matavimo prietaisuose, svarstyklėse, dozatoriuose ir kt. Pjezoelektriniai mechanizmai nepaprastai jautrūs. Naudojant pjezoelementus, galima aptikti ir išmatuoti labai greitus slėgio kitimus, kurių nefiksuoja kiti prietaisai.

Išnagrinėję dielektrikų poliarizaciją, darome išvadą, kad elektrinis laukas veikia tiek laisvuosius, tiek surištuosius krūvius. Antra vertus, įnešti į elektrinį lauką dielektrikai deformuoja jį, nes keičia jo stiprį (žr.157 formulę), krūvių elektrinės sąveikos jėgas (žr. 154 formulę), kondensatorių talpą (žr. §68 ir §69 formules). Taigi *medžiagos ir elektrinio lauko sąveika yra abipusė*, nes medžiaga ir elektrinis laukas yra dvi skirtingos materijos formos.

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl lauko stiprumas laidininko viduje lygus nuliui, kai krūviai pusiausviri?

2. Kaip suprantate elektrostatinę apsaugą?

3. Iš kur atsiranda laisvieji krūviai metaliniame laidininke?

4. Kodėl elektros krūvių sąveikos jėga dielektrike sumažėja?

5. Oro pramušimo stiprumas 3000 V/mm. Nusivelkant sintetinius rūbus, mus nepiktai bado 2–3 mm ilgio kibirkštėlės. Kodėl nekrintame pakirsti aukštos įtampos?

6. Kokia yra leistina įtampa 0,2 mm storio elektrokartono izoliacijai, kurios pramušimo stiprumas $8 \cdot 10^6$ V/m, jeigu atsargos koeficientas turi būti lygus 4?

65. Elektrinio lauko jėgų darbas perkeliant krūvį

§61 susipažinome su įelektrintų kūnų sąveikos rūšimis. Įelektrintiems kūnams judant, juos veikiančios jėgos atlieka darbą. Iš mechanikos kurso žinome, kad sistema, galinti atlikti darbą dėl kūnų tarpusavio sąveikos, turi potencinės energijos. Galime teigti, kad ir įelektrintų kūnų sistema darbą atlieka tik potencinės energijos, kuri vadinama elektrostatine arba elektros energija, dėka.

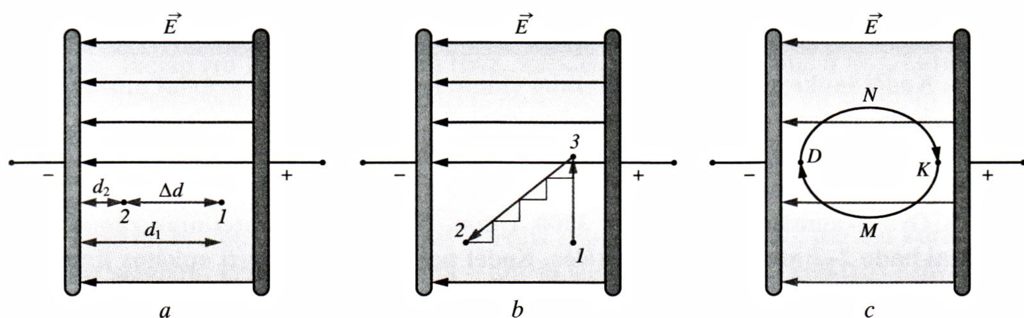
Nagrinėdami Kulono dėsnį, teigėme, kad įelektrintą kūną (krūvį) veikia kitų įelektrintų kūnų (krūvių) sukurti elektriniai laukai. Elektrinio lauko jėga, perkeldama krūvį iš vieno taško į kitą, atlieka darbą, todėl galima teigti, kad įelektrintas kūnas, patalpintas į vienalytį elektrinį lauką, turi energijos, kurią toliau bandysime apibūdinti.

Pirmiausia apskaičiuokime darbą, kuris atliekamas vienalyčiame elektriniame $\vec{E}$ stiprio lauke (jį vaizduojančios jėgų linijos yra tarpusavyje lygiagrečios), kurį sukuria, pvz., dvi didelės metalinės, vertikaliai išdėstytos plokštės, turinčios priešingų ženklų krūvius: plokštės A krūvis neigiamas, o plokštės B – teigiamas (138 pav.). Jeigu į tokį lauką patalpinsime elektros krūvininką, tai jis bus veikiamas elektrinės lauko jėgos $\vec{F} = q\vec{E}$ (analogiškai Žemė veikia arti jos esantį kūną pastovia sunkio jėga $\vec{F} = m\vec{g}$).

Elektrinio lauko jėgos krūvį perkelia išilgai lauko jėgų linijų iš taško *1*, esančio atstumu d_1 nuo neigiamai įelektrintos plokštės A, į tašką *2*, kuris nuo plokštės A yra atstumu d_2 ($d_2 < d_1$). Taškai *1* ir *2*, tarp kurių perkeliamas krūvis, yra išsidėstę vienoje jėgų linijoje, o atstumas tarp jų $d_1 - d_2 = \Delta d$. Vadinasi, elektrinio lauko jėgos atlieka teigiamą darbą, kuris apskaičiuojamas taip:

$$A = F(d_1 - d_2) = qE(d_1 - d_2) = -(qEd_2 - qEd_1). \quad (162)$$

Iš mechanikos kurso žinome, kad sunkio jėgos darbas, atliktas gravitacijos lauke perkeliant kūną iš vieno lauko taško į kitą, nepriklauso nuo kūno judėjimo trajektorijos. Kadangi gravitacijos ir elektrostatinės sąveikos jėgos vienodai priklauso nuo atstumo, o jėgų vektoriai nukreipti išilgai tiesės, jungiančios sąveikaujančius taškinius kūnus, todėl ir darbas, kurį atlieka elektrinio lauko jėgos, perkeldamos krūvį iš vieno lauko taško į kitą, nepriklauso nuo krūvio judėjimo trajektorijos.



138 pav.

Kad darbas nepriklauso nuo trajektorijos formos, įrodysime, pavyzdžiui, apskaičiuodami darbą, kurį reikia atlikti perkeliant krūvį iš taško *1* į tašką *2* per tarpinę padėtį *3*, t. y. kryptimi *1–3–2* (138 pav., *b*). Elektrinio lauko jėgų atliktas darbas, perkeliant krūvį statmena elektrinio lauko stiprio vektoriaus $\vec{E}$ kryptimi (trajektorija *1–3*), lygus nuliui. Poslinkį *3–2* galima pakeisti poslinkiu laiptuota linija (kaip parodyta 138 pav., *b*), turinčia neribotą skaičių mažų laiptelių. Perkeliant taškinį krūvį laipteliais, statmenais elektrinio lauko stiprio $\vec{E}$ vektoriui, darbas nebus atliekamas, o perkeliant krūvį laipteliais, lygiagrečiais lauko stipriui $\vec{E}$, atliktas darbas apskaičiuojamas pagal 162 lygtį, nes visų horizontalių atkarpų ilgių suma lygi atstumui $d_1 - d_2$. Šią išvadą patvirtina ir tiksliausi eksperimentai.

Pasikeitus krūvio judėjimo krypčiai, elektrinio lauko jėgų atliktas darbas, kaip ir sunkio jėgos darbas, keičia ženklą priešingu. Elektrinio lauko jėgos, perkeldamos krūvį q iš taško D į tašką K, atlieka darbą A, o perkeldamos tą patį krūvį q (tuo pačiu keliu) iš taško K į tašką D, atlieka neigiamą darbą ($-A$).

Kadangi darbas nepriklauso nuo trajektorijos, kuria perkeliamas krūvis elektrostatiniame lauke, formos, tai ir, perkeliant krūvį trajektorija *KMD*, atliekamas darbas bus neigiamas ($-A$). Taip samprotaudami, galime daryti išvadą, kad elektrostatinio lauko jėgų darbas perkeliant krūvį uždara trajektorija lygus nuliui (138 pav., *c*).

Darbas, kurį atlieka elektrostatinio lauko jėgos, perkeldamos krūvį bet kuria uždara trajektorija, lygus nuliui.

Laukas, kurio jėgų atliktas darbas uždara trajektorija lygus nuliui, vadinamas potenciãliniu laukù.

Žemės gravitacijos ir elektrostatinis laukai yra potencialiniai laukai.

Lygindami elektrostatinę sąveiką su gravitacine, iš §19 prisimename, kad m masės kūnas Žemės gravitaciniame lauke turi potencinės energijos, todėl sunkio jėgos darbas lygus potencinės energijos pokyčiui su minuso ženklu (žr. 57 lygtį).

Gravitacijos lauke esantis m masės kūnas turi potencinės energijos, kuri proporcinga jo masei, o elektrostatiniame lauke esančio krūvio potencinė energija W_p, remiantis analogija, būtų proporcinga krūviui q. Vadinasi, elektrostatinio lauko jėgų darbas A lygus krūvio potencinės energijos pokyčiui su minuso ženklu:

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}) = -\Delta W_p. \qquad (163)$$

Lygindami 162 ir 163 lygtis, gauname vienalyčiame elektrostatiniame lauke esančio krūvio potencinės energijos išraišką:

$$W_p = qEd. \tag{164}$$

Ši lygtis yra virš Žemės paviršiaus pakelto kūno potencinės energijos ($W_p = mgh$) analogas, tačiau, skirtingai negu masė m, krūvis q gali būti teigiamas arba neigiamas.

Elektrinio lauko jėgoms atliekant teigiamą darbą, įelektrinto kūno potencinė energija mažėja ($\Delta W_p < 0$), o atliekant neigiamą darbą, potencinė energija didėja ($\Delta W_p > 0$). Ši savybė taikoma elektronams stabdyti arba pagreitinti naudojant elektrinį lauką oscilografo ar televizoriaus vamzdžiuose, elektroninėse lempose ir kt.

Iš 164 formulės akivaizdu, jog plokštės A paviršiuje potencinė energija lygi nuliui – tai ir yra potencinės energijos nulinis lygmuo, kuris pasirenkamas laisvai, kaip ir gravitacinės sąveikos metu. Ir vis dėl to fizikinę prasmę turi ne pati elektrinio lauko potencinė energija, o jos pokytis, kurį suprantame kaip elektrostatinio lauko jėgų atliktą darbą perkeliant krūvį iš vieno lauko taško į kitą.

Klausimai ir užduotys

1. Kaip potencinės energijos pokytis susijęs su elektrinio lauko darbu?

2. Kaip apskaičiuoti vienalyčiame elektriniame lauke esančios elektringosios dalelės potencinę energiją?

3. Ar sumažės trauka tarp teigiamojo ir neigiamojo taškinių krūvių, jei tarp jų padėsime gintarinį rutuliuką?

4. Kokiu atstumu turi būti elektronas nuo protono, kad elektronui suteikiamas pagreitis būtų lygus laisvojo kritimo pagreičiui?

5. Kiek kartų turėtų būti didesnės elektronų masės, kad jų gravitacinė trauka atsvertų elektrostatinę stūmą?

6. Kokiu pagreičiu protonas artėja prie neigiamo vienkrūvio anglies jono tuo momentu, kai atstumas tarp jų lygus 10 cm?

7. Dvi horizontalios plokštės sukuria elektrinį lauką, kurio stipris 49 V/m. Tame lauke kybo pusiausvira dulkelė, turinti $2 \cdot 10^{-8}$ C krūvį. Kokia yra dulkelės masė?

66. Elektrostatinio lauko potencialas ir potencialų skirtumas

Nagrinėdami kūnų tarpusavio sąveiką mechanikoje, įsitikinome, kad ji apibūdinama jėga arba kūno potencine energija. Tuo tarpu krūvių sąveika elektrostatiniame lauke yra apibūdinama elektrinio lauko stipriu (tai jėgos analogas mechanikoje) ir elektrostatinio lauko potencialu (energetinė lauko charakteristika).

§ 65 įrodėme, kad elektrostatinis laukas yra potencialinis, ir jo jėgų atliktą darbą, perkeliant krūvį iš vieno lauko taško į kitą bet kokia trajektorija, išreiškėme potencinės energijos pokyčiu (163 lygtis). Ši lygtis tinka bet kokiam elektrostatiniam laukui. Jeigu laukas vienalytis, tai jo potencinė energija apibūdinama 164 lygtimi. Tame pačiame elektrostatinio lauko taške esančių krūvių potencinė energija gali būti skirtinga, tačiau potencinės energijos W_p ir krūvio q santykis nagrinėjamame lauko taške yra pastovus dydis. Jis laikomas nagrinėjamo lauko taško energetine charakteristika.

Fizikinis dydis, lygus elektriniame lauke esančio elektros krūvio potencinės energijos ir to krūvio santykiui, vadinamas elektrinio laūko potencialù φ:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}. \tag{165}$$

Iš šios lygties matyti, kad krūvio potencinė energija W_p lygi krūvio q ir elektrinio lauko potencialo φ nagrinėjamame taške sandaugai: $W_p = q\varphi$.

Elektros krūvio potencinės energijos dydis nagrinėjamame elektrinio lauko taške priklauso ne tik nuo lauko charakteristikų, bet ir nuo šiame taške esančio krūvio ženklo bei pasirinkto potencinės energijos atskaitos nulinio lygio.

Elektrinio lauko potencialas – skaliarinis dydis. Kai tam tikrame erdvės taške du krūviai vienu metu sukuria elektrinius laukus, kurių potencialai φ_1 ir φ_2, tai atstojamojo elektrinio lauko potencialas φ lygus potencialų φ_1 ir φ_2 algebrinei sumai: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$. Analogiškai randame elektrinio lauko, kurį sukuria bet koks skaičius elektros krūvių, potencialą:

$$\varphi = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i. \tag{166}$$

Taško, nutolusio nuo krūvio atstumu r, potencialas išreiškiamas formule

$$\varphi = k\frac{q}{\varepsilon r}. \tag{167}$$

Išsiaiškinome (§65), kad, perkeldamos krūvį q, elektrostatinio lauko jėgos atlieka darbą, kuris lygus krūvio potencinės energijos pokyčiui ΔW_p su minuso ženklu. Remdamiesi 163 ir 165 formulėmis, gauname, kad

$$A = q\varphi_1 - q\varphi_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2). \tag{168}$$

Elektrinio lauko jėgų atliekamas darbas, perkeliant taškinį elektros krūvį elektrostatiniame lauke, yra lygus šio krūvio q ir pradinio bei galinio taškų potencialų skirtumo sandaugai.

Kadangi elektrostatinio lauko jėgų darbas, perkeliant krūvį tame lauke tarp dviejų jo taškų, nepriklauso nuo krūvio judėjimo trajektorijos, tai ir dviejų elektrinio lauko taškų potencialų skirtumas nepriklauso nuo krūvio judėjimo trajektorijos ir gali būti elektrostatinio lauko energetinė charakteristika.

Teoriškai priimta be galo nutolusio taško potencialą laikyti lygiu nuliui. Praktikoje dažnai tokiu laikomas Žemės potencialas, nes skaičiavimuose svarbu žinoti potencialų skirtumą tarp kurių nors taškų, o ne absoliučiąsias potencialų reikšmes tuose taškuose. Kai kalbame apie kurio nors taško potencialą, tai paprastai jį suprantame kaip potencialų skirtumą tarp to ir kito taško, kuriame potencialą susitarta laikyti lygiu nuliui (pvz., Žemės potencialą).

Potencialų skirtumo vienetą nustatome iš 168 formulės: $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}$. Potencialų skirtumas (Δφ) dažnai vadinamas įtampa ir žymimas U:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = \frac{A}{q}. \tag{169}$$

SI vienetų sistemoje potencialo ir potencialų skirtumo (įtampos) matavimo vienetas yra *vòltas*. **Dviejų elektrinio lauko taškų potencialų skirtumas yra lygus 1 V, kai, pernešant tarp tų taškų 1 C elektros krūvį, atliekamas 1 J darbas.**

$$[U]=[\Delta\varphi]=\frac{1\text{J}}{1\text{C}}=1\text{V}.$$

Žinodami buitinio tinklo įtampą, galime pasakyti, kokį darbą atlieka elektrinis laukas, perkeldamas vienetinį krūvį iš lizdo vieno kontakto į kitą bet kuria elektrine grandine. Įtampa tarp laidų, kuriais tiekiama elektros energija buityje, lygi 220 V, kišeninio žibintuvėlio lemputės gnybtų įtampa – 3,5 V. Dar mažesnės įtampos reikia elektroninio laikrodžio ir skaičiuotuvo darbui. Technikoje dažnai naudojamos ir labai aukštos įtampos: pvz., tolimojo elektros perdavimo linijose įtampa siekia net 500 kV, o televizoriaus vamzdyje elektronams greitinti sudaroma 20 kV įtampa.

Atominėje ir branduolinėje fizikoje darbas ir energija dažnai matuojami *elektronvòltais (eV)*.

1 eV – tai toks darbas, kurį atlieka elektrinis laukas, perkeldamas vieną elementarųjį krūvį, lygų elektrono krūviui (q_e = 1,6 · 10^{-19} C), tarp dviejų taškų, kurių potencialų skirtumas lygus 1 V.

$$[A] = 1\ \text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 1\ \text{V} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}.$$

Klausimai ir užduotys

1. Kokie laukai vadinami potencialiniais?

2. Ką charakterizuoja potencialas? Apibūdinkite jį.

3. Kaip dviejų taškų potencialų skirtumas priklauso nuo elektrinio lauko darbo?

4. Pateikite elektronvolto apibrėžimą ir nurodykite jo ryšį su darbo matavimo vienetu džauliu.

5. Elektroninis greitintuvas suteikia protonams 70 · 10^9 eV energiją. Išreikškite ją džauliais. Išreikškite elektronvoltais 1000 km/s greičiu judančio elektrono energiją.

6. Kodėl elektrometro korpusas daromas metalinis ir įžeminamas? Ar galime išmatuoti laidininko potencialą, sujungę jį su elektrometro korpusu, o elektrometro strypelį ir rodyklę įžeminę? Ką rodys elektrometras, jeigu su juo ilgu laidininku sujungtą bandomąjį rutuliuką brauksime įelektrinto bet kokios formos laidininko paviršiumi?

7. Perkeliant 120 μC krūvį iš taško, kuriame lauko nėra, į nurodytą lauko tašką, buvo atliktas 6 · 10^{-4} J darbas. Apskaičiuokite lauko potencialą tame taške.

8. Kokį darbą atlieka elektrinis laukas, perkeldamas 4,6 μC krūvį tarp taškų, kurių potencialų skirtumas lygus 2000 V?

9. Kokį darbą reikia atlikti, norint perkelti taškinį 2 · 10^{-8} C krūvį iš begalybės į tašką, esantį 28 cm atstumu nuo laidaus rutulio paviršiaus? Rutulys yra ore, jo spindulys 2 cm, o potencialas 300 V.

10. Elektrinį lauką glicerine kuria taškinis 0,9 · 10^{-8} C krūvis. Apskaičiuokite dviejų taškų, nutolusių nuo krūvio 3,0 ir 12 cm, potencialų skirtumą.

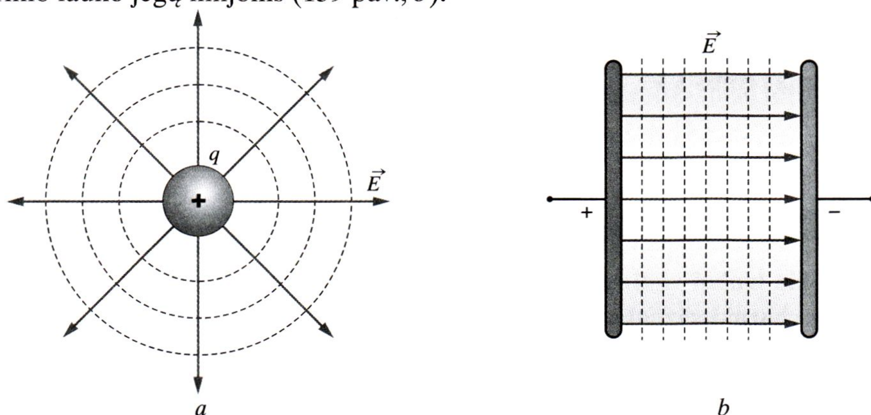
67. Ekvipotencialiniai paviršiai. Ryšys tarp elektrinio lauko stiprio ir potencialų skirtumo

Bet kuriame elektriniame lauke yra daug taškų, turinčių tą patį potencialą. **Vienodo potencialo taškų geometrinė vieta erdvėje vadinama vienodo potencialo paviršiumi, arba tiesiog ekvipotenciãliniu pavir̃šiumi.**

Žinome, kad apie teigiamąjį taškinį elektros krūvį q (139 pav., *a*) elektrinio lauko jėgų linijos eina spindulių kryptimi. Bet kokio spindulio r_1, r_2, r_3 koncentrinė sfera, kurios centre yra krūvis q, yra atskiras ekvipotencialinis paviršius (žr. 167 formulę).

Ekvipotencialiniai paviršiai visada yra statmeni juos kertančioms elektrinio lauko jėgų linijoms, todėl juos nesunku nubrėžti žinant elektrinių laukų jėgų linijų kryptį.

Kai elektrinį lauką kuria dvi metalinės lygiagrečios plokštės, tarp kurių elektrostatinis laukas yra vienalytis, tai jo ekvipotencialiniai paviršiai bus tiesės, statmenos elektrinio lauko jėgų linijoms (139 pav., *b*).



139 pav.

Perkeldama teigiamąjį taškinį krūvį q išilgai vienalyčio elektrinio lauko jėgų linijų atstumu d, elektrinio lauko (Kulono) jėga $\vec{F}$ atlieka darbą, lygų $A = Fd$. Kadangi elektrinio lauko jėgos F didumas lygus $F = qE$, tai ir jos atliktas darbas $A = qEd$.

Žinome, kad elektrinio lauko jėgų atliktą darbą galima rasti ir žinant įtampą (potencialų skirtumą) tarp pradinio ir galinio lauko taškų: $A = qU$.

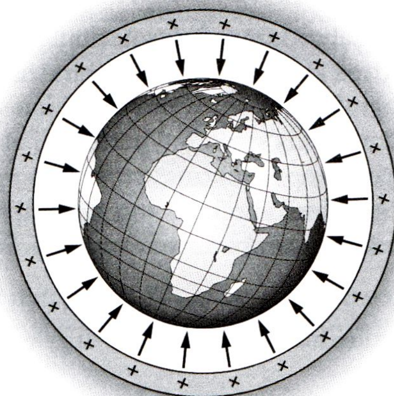
Iš šių samprotavimų darome išvadą, jog įtampa U (arba potencialų skirtumas) tarp dviejų vienalyčio elektrinio lauko taškų, kurie yra vienoje elektrinio lauko jėgų linijoje, lygi lauko stiprio vektoriaus $\vec{E}$ modulio ir atstumo d tarp šių taškų sandaugai: $U = \varphi_1 - \varphi_2 = Ed$. Iš pastarosios lygties randame elektrinio lauko stiprį:

$$E = \frac{U}{d} \quad \text{arba} \quad E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}. \qquad (170)$$

SI vienetų sistemoje elektrinio lauko stiprio matavimo vienetas yra *vòltas mètrui*: $[E] = \frac{1\text{V}}{1\text{m}} = 1\ \text{V/m}$. Tai stipris tokio elektrinio lauko, kuriame 1 m atstumu išilgai lauko jėgų linijos įtampa arba potencialų skirtumas pakinta 1 V.

Remiantis atliktų tyrimų rezultatais, mes gyvename stipriame Žemės elektriniame lauke, kadangi jos elektros krūvis lygus maždaug $6 \cdot 10^5$ C. Arti Žemės paviršiaus šio lauko stipris apytiksliai lygus 130 V/m. Tolstant nuo Žemės, elektrinio lauko stipris staigiai mažėja ir jau 10 km aukštyje yra lygus nuliui.

Maždaug 80 km aukštyje virš Žemės paviršiaus prasideda jonosfera (deguonies, azoto molekulės bei atomai jonizuojami ir susidaro jonizuotas atmosferos sluoksnis), kuriame daugiausiai yra teigiamojo krūvio. Todėl Žemės elektrinio lauko jėgų linijos eina nuo jonizuotojo sluoksnio link Žemės paviršiaus (140 pav.).



140 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl, tolstant nuo teigiamojo krūvio, lauko potencialas mažėja, o nuo neigiamojo – didėja?

2. Kodėl, krūviui judant ekvipotencialine linija, darbas lygus nuliui?

3. Įrodykite, kad abu elektrinio lauko SI vienetai – N/C ir V/m – yra tapatūs.

4. Išreikškite SI vienetais 1 MeV energiją.

5. Kaip potencialų skirtumas yra susijęs su elektrinio lauko stipriu?

6. Elektrostatinio lauko potencialas didėja iš apačios į viršų. Kaip nukreiptas lauko stiprio vektorius?

7. Pavaizduokite be galo ilgo laidaus tolygiai įelektrinto ritinio ekvipotencialinius paviršius.

8. Kokį darbą atlieka elektrinis laukas, perkeldamas 4,6 μC krūvį tarp taškų, kurių potencialų skirtumas lygus 2000 V?

9. Elektrinį lauką vakuume kuria taškinis $1{,}5 \cdot 10^{-9}$ C krūvis. Koks yra atstumas tarp dviejų ekvipotencialinių paviršių, kurių potencialai 45 V ir 30 V?

10. Elektrono, judančio elektriniame lauke, greitis padidėjo nuo $1 \cdot 10^7$ m/s iki $3 \cdot 10^7$ m/s. Raskite elektrono poslinkio pradinio ir galinio taško potencialų skirtumą. Elektrono krūvio ir jo masės santykis $\frac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11}\ \frac{\text{C}}{\text{kg}}$.

11. Du krūviai, kurių didumas lygus $5 \cdot 10^{-8}$ C, nutolę vakuume vienas nuo kito 1 m atstumu. Raskite elektrinio lauko stiprį ir potencialą taške, esančiame ties viduriu tarp tų krūvių.

12. Žaibo išlydžio ilgis 150 m. Koks potencialų skirtumas yra audros debesyje, jeigu orui pramušti reikalingas 10^6 V/m stiprio elektrinis laukas?

68. Elektrinė talpa. Kondensatoriai

Labai dažnai elektrotechnikoje ir radioelektronikoje reikia sukaupti tam tikrą kiekį elektros krūvio, pvz., kad kibirkštis uždegtų kuro mišinį variklyje ar blykstelėtų šviesa fotografuojant bei įvairiems kitiems praktiniams reikalams. Kartais būna atvirkščiai, kažkur reikia sutalpinti perteklinį elektros krūvio kiekį. Kai kurie laidininkai pasižymi savybe kaupti elektros krūvį.

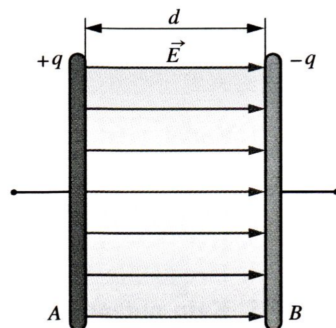
Pasirinkime kokį nors pavienį laidininką, pakankamai nutolusį nuo kitų kūnų, ir suteikime jam skirtingus elektros krūvius q_1, q_2, q_3 bei išmatuokime atitinkamus jo gnybtų potencialus φ_1, φ_2, φ_3. Tiriant tą patį laidininką, santykis $\frac{q_1}{\varphi_1}, \frac{q_2}{\varphi_2}, \frac{q_3}{\varphi_3}$ ir t. t. yra pastovus ir vadinamas *elektrinė talpa*. Ji žymima raide C:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \tag{171}$$

Elektrinė talpa skaitine verte lygi tokiam elektros kiekiui (krūviui), kuris laidininko potencialą pakeičia vienetu.

Dabar paimkime du, vieną nuo kito nutolusius, laidininkus A ir B (141 pav.). Kitų laidininkų arti jų nėra.

Laidininkas A įelektrintas teigiamu krūviu $(+q)$, o B – neigiamu krūviu $(-q)$. Tarp šių laidininkų susikuria elektrinis laukas, kurio stipris proporcingas jų elektros krūviui q ir priklauso nuo jų geometrinės formos bei padėties erdvėje. Tarp šių laidininkų susidarys elektrinė įtampa (arba potencialų skirtumas), kuri priklauso nuo elektrinio lauko stiprio. Apibendrindami šiuos samprotavimus, darome išvadą, jog įtampa U, susidariusi tarp laidininkų A ir B, kaip ir elektrinio lauko stipris $\vec{E}$, taip pat priklausys nuo laidininkų elektros krūvio dydžio ir jų konfigūracijos. Ši įtampa išreiškiama taip: $U = \frac{q}{C}$. Dydis C priklauso tik nuo laidininkų sistemos formos ir padėties. Iš pastarosios lygties išreiškę elektros kiekį, sukauptą laidininkuose A ir B, gauname: $q = CU$. Akivaizdu, kad dviejų laidininkų sistemos sukauptas elektros kiekis q yra proporcingas susidariusiai tarp jų elektrinei įtampai (arba potencialų skirtumui). Proporcingumo koeficientą C, priklausantį tik nuo sistemos geometrinės formos, vadiname sistemos elektrine talpa, kurią iš turimų lygčių galima užrašyti taip:



141 pav.

$$C = \frac{q}{U}, \text{ arba } C = \frac{q}{\Delta\varphi}. \tag{172}$$

Iš šios lygties nustatome tarptautinės SI vienetų sistemos elektrinės talpos matavimo vienetą – *faradą*, pavadintą anglų fiziko Maiklio Faradėjaus (1791–1867) garbei: $[C] = \frac{1\text{C}}{1\text{V}} = 1\text{F}$.

1 F – tai talpa tokio laidininko, kurio potencialas pakinta 1 V laidininkui suteikus 1 C krūvį.

Vieno farado talpa labai didelė, realiai ji neegzistuoja, nes vieno kulono krūvis yra pakankamai didelis krūvis, kurio realiuose laidininkuose nesukaupiama. Todėl praktikoje naudojami daliniai farado vienetai: *mikrofarãdas* (μF), *nanofarãdas* (nF) ir *pikofarãdas* (pF).

1 μF = 10^{-6} F; 1 nF = 10^{-9} F; 1 pF = 10^{-12} F.

Paprasčiausiais įvairiarūšių elektros krūvių perskyrimo būdais – suliečiamų kūnų įelektrinimu, elektrostatine indukcija – kūnų paviršiuje atsiranda palyginti nedaug laisvųjų elektros krūvių. Dideliems įvairiarūšių elektros krūvių kiekiams sukaupti naudojami *kondensãtoriai*.

Kondensãtoriumi vadinama dviejų laidininkų (elektrodų) sistema, perskirta plonu dielektriko sluoksniu ir skirta elektros krūviui kaupti.

Laidininkai, kuriuose kaupiasi elektros krūviai, vadinami elektròdais ir įelektrinami vienodo didumo, bet priešingų ženklų krūviais. Elektrodai paprastai yra atskirti dielektriko sluoksniu, kuris neleidžia elektros krūviams susijungti ir neutralizuotis bei poliarizuojasi ir taip padidina kondensatoriaus talpą. Kondensatoriai gaminami įvairiausių formų ir rūšių, tačiau dažniausiai naudojami *plokštíeji kondensãtoriai*. Išnagrinėkime, kaip apskaičiuojama plokščiojo ir rutulio formos kondensatorių talpa.

Didelę praktinę reikšmę turintį plokščiąjį kondensatorių sudaro dvi (o kartais ir daugiau) vienodo paviršiaus ploto S lygiagrečios metalinės plokštelės (elektrodai), nutolusios viena nuo kitos nedideliu atstumu d lyginant su plokštelių ilgiu. Kai tarp plokštelių sudarysime elektrinę įtampą U (kondensatorių įkrausime), tai plokštelės įsielektrins priešingo ženklo krūviais: viena teigiamai $+q$, o kita neigiamai $-q$ (141 pav.). Joms suteiktas elektros kiekis $q = CU$. Iš 172 formulės matyti, kad tokio kondensatoriaus talpa bus lygi vienos plokštelės krūvio q ir abiejų plokštelių potencialų skirtumo $\varphi_1 - \varphi_2$ santykiui:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}.$$

Kai plokštelių plotas didelis, visos iš teigiamojo krūvio $(+q)$ išeinančios elektrinio lauko jėgų linijos sueina į neigiamąjį krūvį $(-q)$ ir išsidėsto lygiagrečiai tarp kondensatoriaus plokštelių. Taigi elektrinis laukas kondensatoriaus viduje yra vienalytis ir jo stipris $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0 S}$; čia S – vienos plokštelės plotas, $\sigma = \frac{q}{S}$ – plokštelės paviršinio krūvio tankis (žr. §63). Kita vertus, pagal 170 formulę vienalyčio elektrinio lauko stipris tarp plokštelių bus $E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$; čia $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$ – potencialų skirtumas, o d – atstumas tarp plokštelių. Sulyginkime pastarųjų formulių dešiniąsias puses: $\frac{q}{\varepsilon_0 S} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$, arba $\frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$. Iš pastarosios ir iš plokščiojo kondensatoriaus talpos formulių gauname:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}. \qquad (173)$$

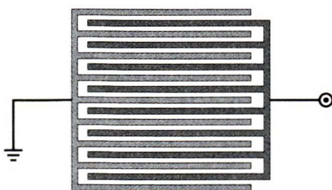
Tai plokščiojo kondensatoriaus talpos formulė, iš kurios matyti, kad talpa tokiame kondensatoriuje tiesiog proporcinga plokštelės (elektrodo) plotui ir atvirkščiai proporcinga atstumui tarp jų. Vakuumo elektrinė konstanta $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\frac{\text{F}}{\text{m}}$.

Tarp plokščiojo kondensatoriaus elektrodų (plokštelių) įdėjus dielektriką (žr. §64), jo talpa padidėja ε kartų:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \qquad (174)$$

Priklausomai nuo dielektriko medžiagos kondensatoriai vadinami *popieriniais, žėrutiniais, keramikiniais, elektrolitiniais, oriniais* ir t. t.

Plokščiąjį kondensatorių sudarius iš n plokštelių (elektrodų), sujungtų kaip parodyta 142 paveiksle, talpa padidėja $(n - 1)$ karto:



142 pav.

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}(n-1). \qquad (175)$$

Dabar išveskime įelektrinto pavienio rutulio, kurio spindulys R, talpą, kai jis yra vienalytėje aplinkoje. Jei įelektrinto rutulio krūvis lygus q, tai jo paviršius yra ekvipotencialinis, o tokio paviršiaus potencialas išreiškiamas 165 formule. Šią formulę įrašę į 171 formulę, gauname:

$$C = \frac{\varepsilon R}{k}. \qquad (176)$$

Iš šios išraiškos matyti, kad rutulio talpa yra tiesiog proporcinga rutulio spinduliui R ir aplinkos santykinei dielektrinei skverbčiai ε, t. y. priklauso nuo supančio dielektriko savybių.

Jei arti įelektrinto laidininko yra kiti kūnai – laidininkai ar dielektrikai, tai jo potencialas ir elektrinė talpa priklauso nuo kaimyninių kūnų formos, matmenų ir padėties, nes tuose laidininkuose indukuojasi elektros krūviai, o dielektrikai poliarizuojasi, todėl jie sumažina duotojo laidininko potencialą ir padidina jo talpą.

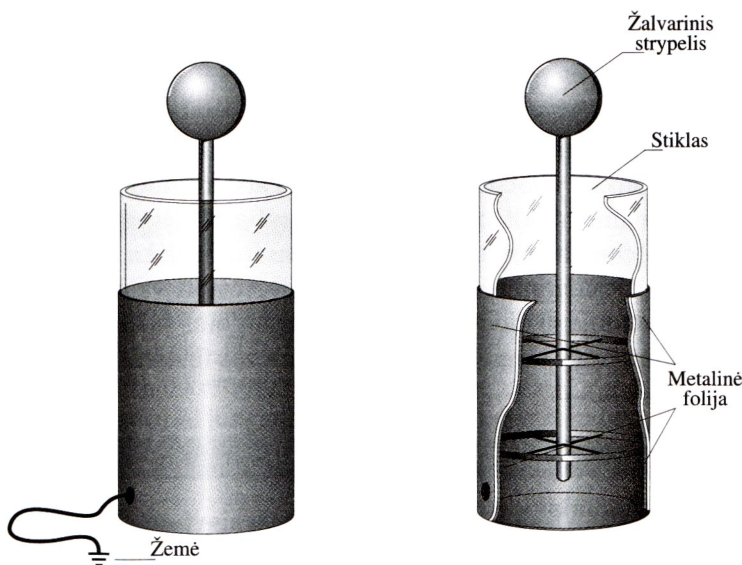
Tyrinėjant laidininkų elektrinę talpą, pastebėtos šios elektrinės talpos savybės:

1. Elektrinė talpa nepriklauso nuo laidininko medžiagos (nepriklauso nuo medžiagos krūvių pasiskirstymo laidininke).
2. Elektros krūviai pasiskirsto tik laidininko išoriniame paviršiuje, todėl elektrinė talpa nepriklauso nuo to, koks yra laidininkas – tuščiaviduris ar pilnaviduris.
3. Elektrinė talpa priklauso nuo laidininko paviršiaus ploto.
4. Elektros krūvio pasiskirstymas priklauso nuo laidininko paviršiaus formos, todėl elektrinė talpa priklauso ir nuo laidininko formos.
5. Laidininko talpa priklauso nuo arti esančių kitų laidininkų ir nuo jį supančios aplinkos dielektrinių savybių (ε).

Kondensatoriai apibūdinami ne tik elektrine talpa, bet ir *pramušimo įtampa*, t. y. tokiu mažiausiu plokštelių potencialų skirtumu, kuriam esant pramušamas dielektriko sluoksnis ir tarp kondensatoriaus plokštelių šoka kibirkštis. Pramušimo įtampos didu-

mas priklauso nuo dielektriko savybių, jo storio ir formos, todėl nuotolis tarp plokštelių turi atitikti įtampą. *Pramuštas dielektrikas nebetenka dielektrinių savybių ir tampa laidininku.* Kondensatorius su pramuštu dielektriku nėra tinkamas naudojimui. Paprastai ant kondensatorių pažymima didžiausia leidžiama įtampa.

Pirmąjį kondensatorių 1745 m. atsitiktinai padarė ir išbandė Leideno universiteto (Olandija) fizikas Piteris Mušenbrukas (1692–1761), panorėjęs gauti elektrizuotą vandenį, kuris tuo metu buvo madingas vaistas. Jis prijungė elektros mašiną prie vinies, įkištos į stiklinę su vandeniu, o paskui netyčia prisilietė prie tos vinies ir pajuto stiprų elektros smūgį. Žinia apie tai greitai pasklido po Europą – išbandyti su savo pažįstamais Leideno stiklinės veikimą tapo pamėgta pramoga.



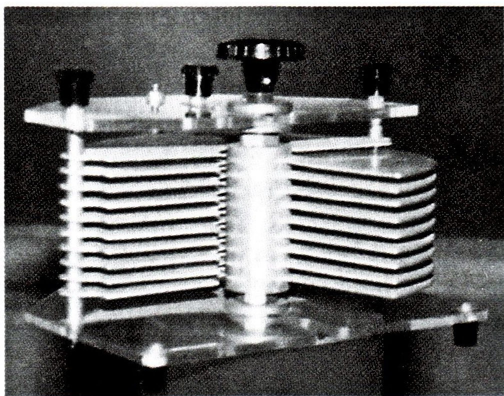
143 pav.

Bendžaminas Franklinas (*Franklin*) nustatė, kad elektros krūvį dar geriau kaupia tuščia stiklinė, iš abiejų pusių padengta metalo folija (143 pav.). Folija sudaro kondensatoriaus elektrodus. Išorinis elektrodas įžeminamas, o vidinis žalvariniu strypeliu prijungiamas prie elektros šaltinio poliaus ir įkraunamas. Vėliau paaiškėjo, jog ir stiklinė nebūtina, nes elektrą galima kaupti bet kokiuose dviejuose laidininkuose, atskirtuose elektrai nelaidžios medžiagos sluoksniu. Toks įrenginys buvo pavadintas elektros kondensatoriumi arba pažodžiui – *elèktros tirštintuvù.*

Didesni elektros krūviai įgalino atlikti efektingus bandymus, kurie sukėlė ne tik mokslininkų, bet ir visuomenės susidomėjimą. Tapo madinga rengti viešus elektros bandymus. Jų metu Leideno stiklinė būdavo iškraunama per rankomis susijungusių žmonių grandinę, elektra veikiami gyvūnai, stebimos kibirkštys, šokinėjančios iš sieros rutulio elektros mašinoje ar iš jį liečiančios damos rankos.

Be pastoviosios talpos kondensatorių, praktikoje plačiai naudojami kintamosios elektrinės talpos kondensatoriai. Tokį kondensatorių sudaro du izoliuoti vienas nuo kito metalinių plokštelių blokai. Vieno bloko plokštelės nejudamos, kito – pritvirtintos

prie judamos ašies (144 pav.). Sukant rankenėlę, judamosios plokštelės tai daugiau, tai mažiau įeina į tarpus tarp nejudamų plokštelių, ir kondensatoriaus talpa kinta proporcingai persidengiančių plokštelių dalių plotui. Didėjant plotui, kurį sudaro dengiančios viena kitą plokštės, kondensatoriaus elektrinė talpa didėja, mažėjant plotui – mažėja. Kintamosios talpos kondensatoriaus žymuo elektrinėse schemose parodytas 145 paveiksle.



144 pav.

Kondensatoriai, kaupiantys elektros krūvius ir elektrinio lauko energiją, plačiai taikomi įvairiuose radioelektronikos ir elektrotechnikos įrenginiuose: kintamosios srovės lygintuvuose pulsacijoms lyginti, elektros srovės nuolatinei komponentei atskirti nuo kintamosios. Jų gausu kiekviename radiotechnikos, laidinio ryšio, skaičiavimo technikos ir impulsinės technikos prietaisuose. Kondensatorių dėka orkestro muzika yra išskaidoma į sudėtinius dažnius, kurie paverčiami įvairiaspalvės šviesos impulsais. Taip pat jie naudojami didelėms energijos atsargoms sukaupti atliekant lazerinės technikos ir valdomosios termobranduolinės sintezės fizikinius eksperimentus.



145 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname laidininkų elektrine talpa?

2. Kas daro įtaką laidininkų elektrinei talpai?

3. Kad įsivaizduotumėte, kokio didumo yra talpos vienetas faradas, apskaičiuokite Žemės talpą.

4. Kokį potencialą įgijo 0,45 · 10^{-11} F talpos metalinis rutuliukas, būdamas ore ir įgavęs 1,8 · 10^{-7} C krūvį? Koks to rutuliuko spindulys?

5. Kokį krūvį reikia suteikti 2 μF talpos kondensatoriui, kad jis įsikrautų iki 400 V potencialų skirtumo?

6. Kondensatoriaus elektrodai padaryti iš 1,5 m ilgio ir 0,9 m pločio aliuminio folijos, o į tarpą įdėtas 10^{-4} m storio parafinuotas popierius. Kokia to kondensatoriaus talpa? Kokį didžiausią krūvį gali sukaupti kondensatorius, jeigu jis skirtas 250 V įtampai? Parafino dielektrinė skvarba lygi 2.

7. Į tarpą tarp plokščiojo kondensatoriaus elektrodų per visą jo plotą buvo įdėtas žėručio (izoliatoriaus) lakštelis. Kaip dėl to pasikeitė kondensatoriaus talpa ir krūvis?

8. Kondensatoriaus, sudaryto iš dviejų lygiagrečių plokščių, talpa 5 pF. Apskaičiuokite plokštelėse susikaupusį elektros krūvį, jeigu žinoma, kad potencialų skirtumas tarp jų lygus 1000 V.

9. Paviršinio krūvio tankis plokščiojo kondensatoriaus plokštelėse, patalpintose vakuume, lygus 3 · 10^{-11} C/cm^2. Kondensatoriaus plokštelės plotas 100 cm^2, jo talpa –

10 pF. Apskaičiuokite elektrono greitį, kurį jis įgyja, judėdamas nuo vienos kondensatoriaus plokštelės link kitos. Elektrono krūvio ir masės santykis $\frac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11}$ C/kg.

10. Potencialų skirtumas tarp 0,1 μF talpos kondensatoriaus elektrodų pakito 175 V. Apskaičiuokite kondensatoriaus krūvio pokytį.

11. Plokščiojo kondensatoriaus, kurio dielektrikas – žėrutis, krūvis lygus $2{,}7 \cdot 10^{-4}$ C. Atstumas tarp kondensatoriaus plokščių 0,23 mm, o kondensatoriaus be dielektriko talpa – 0,01 μF. Žėručio dielektrinė skvarba lygi 7. Apskaičiuokite lauko stiprį dielektrike.

12. Į erdvę tarp plokščiojo kondensatoriaus plokščių elektronas įlekia $2 \cdot 10^7$ m/s greičiu, nukreiptu lygiagrečiai kondensatoriaus plokštėms. Kokiu atstumu teigiamai įelektrintos plokštės kryptimi pasislinks elektronas, judėdamas kondensatoriaus viduje? Kondensatoriaus ilgis 0,05 m, o potencialų skirtumas tarp plokščių 200 V. Atstumas tarp kondensatoriaus plokščių 0,02 m. Elektrono krūvio ir masės santykis $1{,}76 \cdot 10^{11}$ C/kg.

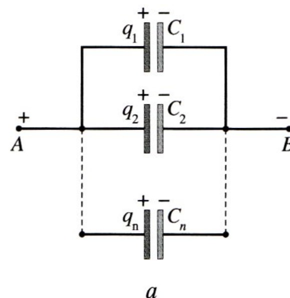
69. Kondensatorių jungimas į baterijas

Norimai talpai sudaryti kondensatorius dažnai jungiame į bateriją. Atskirus kondensatorius galima sujungti lygiagrečiai (146 pav., *a*) arba nuosekliai (146 pav., *b*), o kartais mišriai, t. y. atskirų grupių kondensatoriai jungiami nuosekliai, o grupės tarp savęs – lygiagrečiai (146 pav., *c*) arba atvirkščiai.

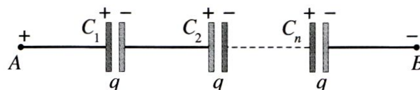
Iš pradžių raskime lygiagrečiai sujungtų kondensatorių baterijos talpą, kai atskirų kondensatorių talpa yra C_1, C_2, ..., C_n (146 pav., *a*). Tokios baterijos ypatumai būtų šie:

a) visų lygiagrečiai sujungtų kondensatorių įtampa (potencialų skirtumas) vienoda, tokia kaip ir visos baterijos įtampa U. Pažymėję įtampas atskiruose kondensatoriuose atitinkamai U_1, U_2, ..., U_n, galėsime užrašyti: $U = U_1 = U_2 = ... = U_n = \text{const}$;

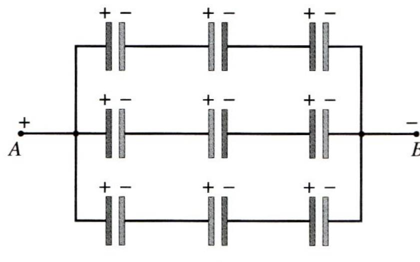
b) sudarius tarp kondensatorių baterijos plokštelių įtampą U, kondensatoriuje, kurio talpumas C_1, susikaups elektros kiekis $q_1 = C_1U$; kondensatoriuje, kurio talpumas C_2, – kiekis $q_2 = C_2U$ ir kondensatoriuje, kurio talpumas C_n, – kiekis $q_n = C_nU$. Visos baterijos elektros kiekis q bus lygus visų kondensatorių elektros kiekių sumai: $q = q_1 + q_2 + ... + q_n$, arba $CU = C_1U + C_2U + ... + C_nU$;



a



b



c

146 pav.

c) pastarosios lygties abi puses padalijame iš U ir gauname

$$C = C_1 + C_2 + ... + C_n, \quad \text{arba} \quad C = \sum_{i=1}^{n} C_i. \tag{177}$$

Vadinasi, **lygiagrečiai sujungtos kondensatorių baterijos talpa lygi atskirų ją sudarančių kondensatorių elektrinių talpų sumai.**

Lygiagrečiai sujungus n vienodos talpos kondensatorių, gautos baterijos talpa bus n kartų didesnė už vieno kondensatoriaus talpą: $C = nC_1$.

Kondensatoriai į baterijas jungiami lygiagrečiai, kai norima padidinti elektrinę talpą.

Dabar sujunkime tuos pačius kondensatorius nuosekliai (146 pav., b) ir išnagrinėkime tokio kondensatorių jungimo ypatumus bei išveskime formulę baterijos talpai C apskaičiuoti:

a) sudarius tarp baterijos kraštinių plokštelių (elektrodų) elektrinę įtampą U, plokštelės įsielektrina elektros kiekiu $q = CU$. Lygiai tokio paties didumo elektros kiekiu q įsielektrina (indukcijos būdu) ir kitos sujungtos vidinės plokštelės, nes visos kondensatoriuje elektrinio lauko jėgų linijos prasideda ir baigiasi ant jo plokštelių. Vadinasi, nepriklausomai nuo kondensatoriaus talpos visų nuosekliai sujungtų kondensatorių elektros kiekis (krūvis) vienodas, o baterijos elektros kiekis q – lygus vieno kondensatoriaus elektros kiekiui (krūviui). Bendriausiu atveju užrašoma taip: $q = q_1 + q_2 + ... + q_n = \text{const}$;

b) kiekviename kondensatoriuje susidaro skirtinga įtampa (potencialų skirtumas), o bendra baterijos įtampa lygi atskirų kondensatorių įtampų sumai: $U = U_1 + U_2 + ... + U_n$;

c) kadangi įtampos dydį kiekviename kondensatoriuje apsprendžia jo talpa, tai įtampa pirmajame kondensatoriuje $U_1 = \frac{q}{C_1}$, antrajame – $U_2 = \frac{q}{C_2}$, n-tajame $U_n = \frac{q}{C_n}$. Šias įtampų išraiškas įrašę į įtampų sumos lygtį ir abi puses suprastinę iš elektros kiekio q, gauname formulę baterijos talpai apskaičiuoti:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ... + \frac{1}{C_n}, \quad \text{arba} \quad \frac{1}{C} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}. \tag{178}$$

Vadinasi, **nuosekliai sujungtos kondensatorių baterijos atvirkštinis talpos dydis lygus atskirų kondensatorių atvirkštinių elektrinių talpų didumų sumai.**

Nuosekliai sujungus n vienodos elektrinės talpos kondensatorių, gautos baterijos talpa bus n kartų mažesnė už vieno kondensatoriaus talpą: $C = \frac{C_1}{n}$;

d) jau išsiaiškinome, kad, nuosekliai sujungus kondensatorius, kiekvieno iš jų įtampa yra skirtinga, todėl, užrašius šių dviejų kondensatorių įtampų santykį $U_1 : U_2 = \frac{q}{C_1} : \frac{q}{C_2}$ ir jį pertvarkius, gauname:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}. \tag{179}$$

Vadinasi, **nuosekliai sujungtų kondensatorių įtampos atvirkščiai proporcingos jų talpoms.**

Taip jungti kondensatorius labai patogu, kai įtampa (potencialų skirtumas) yra labai didelė. Tuomet kiekvienam kondensatoriui tenka n kartų mažesnis potencialų skirtumas ir išvengiama kondensatorių pramušimo.

Klausimai ir užduotys

1. Plokščiasis kondensatorius įkraunamas iš 200 V įtampos šaltinio ir paskui nuo jo atjungiamas. Kokia įtampa susidarys tarp kondensatoriaus plokštelių, kai atstumą tarp jų padidinsime nuo 0,2 mm iki 0,7 mm? Tarpas tarp plokštelių kondensatoriaus viduje užpildytas žėručiu, kurio dielektrinė skvarba lygi 7.

2. Trys kondensatoriai, kurių talpa 2, 4 ir 6 pF, sujungti lygiagrečiai ir prijungti prie 1 kV įtampos šaltinio. Kam lygus kiekvieno kondensatoriaus krūvis?

3. Baterija, sudaryta iš dviejų nuosekliai sujungtų Leideno stiklinių, kurių talpa 300 ir 500 pF, įelektrinama iki 12 kV įtampos. Raskite vienos ir kitos stiklinės įtampą ir krūvį.

4. Įelektrinto plokščiojo orinio kondensatoriaus elektrodai traukia vienas kitą jėga $\vec{F}$. Ar pasikeistų ta jėga, jeigu į tarpą tarp elektrodų įkištume dielektriko plokštelę? Atsakymą pagrįskite.

5. Kiek kartų pakis plokščiojo kondensatoriaus įtampa, lauko stipris ir krūvis, kai atstumą tarp plokščių sumažinsime perpus: a) atjungę jį nuo šaltinio; b) prijungę prie šaltinio?

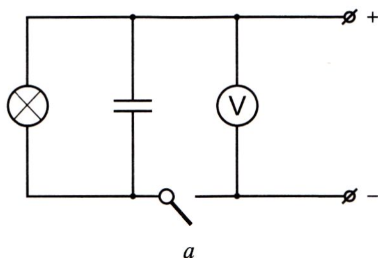
6. Du 2 μF ir 3 μF talpos kondensatoriai nuosekliai prijungti prie 400 V įtampos šaltinio. Apskaičiuokite: a) kondensatorių baterijos talpą; b) kiekvieno kondensatoriaus įtampą.

7. Du vienodi kondensatoriai buvo lygiagrečiai prijungti prie 44 V įtampos šaltinio, paskui nuo jo atjungti. Kokia būtų kondensatorių įtampa, jeigu vieną jų pripildytume glicerino?

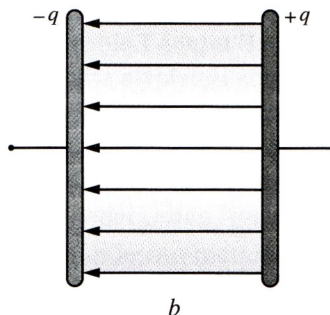
8. 500 V įtampa įkrautas kondensatorius sujungtas su neįkrautu 4 μF talpos kondensatoriumi. Abiejų įtampa 100 V. Kokia pirmojo kondensatoriaus talpa?

70. Įkrauto kondensatoriaus energija

Įkraukime kondensatorių, o paskui, prie jo išvadų prijungę elektros lempą, pastebėsime trumpalaikį blykstelėjimą (147 pav.). Šis bandymas rodo, jog įkrautas kondensatorius turi energijos, nes, jį įkraunant, elektrinio lauko jėgos atliko darbą, atskirdamos teigiamuosius ir neigiamuosius krūvius. Pagal energijos tvermės dėsnį, elektrinio lauko jėgų atliktas darbas lygus kondensatoriaus energijos pokyčiui.



a



b

147 pav.

Tarkime, kad C talpos kondensatoriaus elektrodų krūviai yra $+q$ ir $-q$ ir, remiantis 172 formule, įtampa tarp tokio kondensatoriaus plokščių $U = \frac{q}{C}$. Kondensatoriui išsikraunant, įtampa tarp jo elektrodų mažėja tiesiog proporcingai krūviui q nuo maksimalios reikšmės iki nulio. Todėl vidutinį įtampos dydį kondensatoriaus išsikrovimo metu užrašome taip: $U_{vid} = \frac{U}{2} = \frac{q}{2C}$.

Vadinasi, darbas, kurį atlieka elektrinis laukas, iškraudamas kondensatorių, išreiškiamas taip: $A = qU_{vid}$. Žinodami kondensatoriaus išsikrovimo vidutinį įtampos dydį, elektrinio lauko darbą aprašome tokiomis lygtimis: $A = \frac{q^2}{2C}$ arba $A = \frac{qU}{2}$, arba $A = \frac{CU^2}{2}$.

Iš energijos tvermės dėsnio išplaukia, kad kondensatoriaus, kurio talpa C ir kuris įkrautas iki įtampos U (arba potencialų skirtumo $\Delta\varphi$), elektrinio lauko potencinė energija lygi darbui:

$$W = A = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}. \quad (180)$$

Jau esame minėję (§ 65, § 66), kad įelektrintų kūnų sąveikos potencinė energija yra sukoncentruota tų kūnų elektriniame lauke, todėl ji gali būti išreikšta ir elektrinio lauko stipriu $\vec{E}$. Žinant ryšį tarp įtampos ir elektrinio lauko stiprio ($U = Ed$) bei pasinaudojus 180 formule, akivaizdu, kad kondensatoriaus energija yra proporcinga jo viduje esančio elektrinio lauko stipriui:

$$W = \frac{CE^2d^2}{2}; \quad (181)$$

čia d – atstumas tarp kondensatoriaus plokštelių.

Kondensatoriaus elektrinio lauko energijos tūrinis tankis (energija, tenkanti tūrio vienetui) apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}. \quad (182)$$

Klausimai ir užduotys

1. 3,3 nF talpos Leideno stiklinė įelektrinta iki 20 kV potencialų skirtumo. Koks šilumos kiekis išsiskiria stiklinei išsikraunant, jeigu 10% jos energijos išsisklaido garso ir elektromagnetinėmis bangomis?

2. Varinei vielai suvirinti impulsiniu kontaktiniu būdu naudojamas 1 μF talpos kondensatorius, įkraunamas iki 1200 V įtampos. Kokia yra jo iškrovos vidutinė naudingoji galia, jeigu iškrova trunka 10^{-6} s, o įrenginio naudingumo koeficientas 4%?

3. 3 cm spindulio metalinis rutulys turi $2 \cdot 10^{-8}$ C krūvį. Rutulys įleistas į žibalą taip, kad neliestų indo sienelių. Koks yra lauko energijos tūrinis tankis taškuose, nutolusiuose 2 ir 4 cm nuo rutulio centro?

4. Koks yra elektrostatinio lauko tūrinis energijos tankis taške, esančiame 2 cm atstumu nuo 1 cm spindulio rutuliuko paviršiaus, jeigu rutuliuko paviršinis krūvio tankis lygus 16,5 $\mu C/m^2$? Aplinkos dielektrinė skvarba lygi 2.

5. Elektronas įlekia į orinį plokščiąjį kondensatorių lygiagrečiai jo elektrodams $6 \cdot 10^7$ m/s greičiu ir išlekia iš jo, nukrypęs nuo pradinės krypties $1{,}76 \cdot 10^{-3}$ m. Kondensatoriaus ilgis 3 cm, atstumas tarp elektrodų $2 \cdot 10^{-2}$ m, potencialų skirtumas 400 V. Apskaičiuokite elektrono krūvio ir masės santykį.

6. Tarp įelektrinto plokščiojo kondensatoriaus elektrodų buvo įkištas stiklas, kurio plotas lygus pusei elektrodo ploto. Kaip dėl to pasikeitė kondensatoriaus talpa, energija, elektrodų krūvis ir įtampa?

11 SKYRIUS. NUOLATINĖS ELEKTROS SROVĖS DĖSNIAI

Elektros srovė yra dvidešimtojo amžiaus atradimas, turėjęs bene stipriausią poveikį didžiausiam žmonių skaičiui. Elektros srovė į daugelio milijonų žmonių namus atneša energiją, pasiekiamą paprasčiausiu jungiklio spragtelėjimu. Lietuvoje elektra paskirstoma valstybiniais tinklais – sudėtinga elektros perdavimo linija (grandine), į kurią įjungti gyvenamieji namai, fabrikai, mokyklos, įvairios įstaigos, gyvulininkystės kompleksai, ligoninės ir t. t.

Elektros varomi, veikia įvairiausi laiką ir darbą taupantys įrenginiai, pradedant labai plačia šiuolaikine ryšių sistema ir baigiant elektriniais jutikliais, leidžiančiais gydytojams reguliuoti gyvybines žmogaus kūno funkcijas. Tūkstančių amperų elektros srovės naudojamos geležinkelio sistemoje ir vos vieno mikroampero srovės pakanka, kad tiksėtų mūsų rankinis laikrodis.

Iš pradžių išnagrinėsime *nuolatìnės elèktros srovė̃s* dėsningumus, jos taikymo galimybes ir pasireiškimo pobūdį, nes būtent ji buvo tiriama ir naudojama beveik visą XIX a.

71. Elektros srovė. Jos atsiradimo sąlygos. Elektrovara

Kryptingas elektringųjų dalelių judėjimas vadinamas elektros srove. Jos tekėjimo kryptimi yra laikoma teigiamųjų krūvių judėjimo kryptis.

Pirmiausia išnagrinėkime sąlygas, būtinas elektros srovei atsirasti.

1. *Kad grandine tekėtų elektros srovė, joje turi būti laisvų elektros krūvininkų.* Metaluose tokie krūvininkai yra kovalentiniai (laidumo) elektronai, elektrolituose – teigiamieji ir neigiamieji jonai, dujose – jonai ir elektronai, puslaidininkiuose – elektronai ir skylės.

Iš pradžių aptarsime metalų elektroninį laidumą. Visi metalai yra sudaryti iš mažų kristalėlių, kurie tarp savęs išsidėstę netaisyklingai, todėl didesnio metalo gabalo forma yra netaisyklinga. Tačiau mikroskopiniai jo gabalėliai yra taisyklingos formos ir kristalinės struktūros. Visi metalai yra polikristalai, t. y. sudaryti iš kristalinių gardelių, kuriose teigiamieji jonai išsidėsto ganėtinai tvarkingai.

Žinome, kad kiekvienas atomas yra sudarytas iš teigiamai įelektrinto branduolio ir aplink jį skriejančių elektronų, kurie aplink branduolį išsidėsto tam tikromis orbitomis ir sluoksniais. Kai kurie išorinio sluoksnio elektronai, kitaip dar vadinami kovalentiniais elektronais, netenka ryšio su atskirais atomais, kai šie jungiasi, sudarydami kristalinę gardelę. Tapę laisvais, šie elektronai, niekieno nevaržomi, juda metale, bet išlėkti iš jo negali.

Laisvųjų elektronų skaičius metale apytiksliai atitinka jonų skaičių. Šie elektronai sudaro vadinamąsias *elektrònines dujàs*, kurioms būdingos vienatomių idealiųjų dujų savybės. Laisvieji elektronai metalo viduje juda chaotiškai dideliais nevienodais greičiais, siekiančiais milijonus metrų per sekundę. Teigiamųjų jonų elektrinis laukas neleidžia jiems išlėkti iš metalo, todėl laisvųjų elektronų chaotiškas (šiluminis) judėjimas negali sukelti elektros srovės. Vidutinis jų laisvojo kelio ilgis λ apytiksliai lygus metalo kristalinės gardelės konstantai.

Sudarius tarp metalinio laidininko galų potencialų skirtumą, laisvieji elektronai pradeda judėti tvarkingai ir sukuria elektros srovę. Toks **kryptingas elektronų judėjimas dėl elektrinio lauko poveikio vadinamas elektrònų dreifù**. Jų tvarkingo judėjimo vidutinis greitis yra proporcingas elektrinio lauko stipriui ir apytiksliai lygus vos keletui milimetrų per sekundę (net ir veikiant aukštai įtampai). Tai paaiškinama labai dažnais laisvųjų elektronų susidūrimais su kristalinės gardelės jonais. Vadinasi, elektros srovę sudarančių laisvųjų elektronų vidutinis greitis labai mažas, lyginant su jų šiluminio judėjimo vidutiniu greičiu įprastinėje aplinkos temperatūroje.

2. *Kad tekėtų elektros srovė, laisvuosius krūvius turi veikti vadinamosios pašalìnės jẽgos*, kurių kryptis priešinga elektrostatinės sąveikos jėgų krypčiai. **Jėgos, kurios verčia elektros krūvius judėti nuolatinės srovės šaltinyje prieš elektrinio lauko jėgas, vadinamos pašalìnėmis.** Krūvių elektrostatinės sąveikos jėgos priverčia skirtingo ženklo krūvius susijungti, o pašalinės jėgos juos atskiria ir palaiko tarp jų pastovų potencialų skirtumą. Pašalinės jėgos atsiranda akumuliatoriuje, vykstant elektrocheminiams procesams tarp elektrodo ir elektrolito, galvaniniame elemente, fotoelemente, elektros srovės generatoriaus apvijoje ir kitur. Taigi jos būna įvairios prigimties, pvz., nuolatinės elektros srovės mašinoje pašalinė yra Lorenco (žr. §89) jėga. Pašalinių jėgų poveikis apibūdinamas fizikiniu dydžiu, vadinamu *elektróvara* (evj) ir žymima $\mathcal{E}$. **Elektróvaros skaitinė vertė lygi darbo ($A_{paš}$), kurį atlieka pašalinės jėgos, perkeldamos teigiamą vienetinį krūvį ($+q$) elektros srovės grandine, ir to krūvio santykiui:**

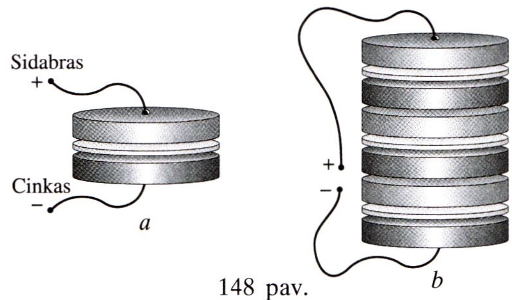
$$\mathcal{E} = \frac{A_{paš}}{q}. \tag{183}$$

Kai elektros srovės grandinė atvira, tai šaltinio evj lygi potencialų skirtumui tarp jo gnybtų. Elektrovaros matavimo vienetas yra toks pats, kaip ir potencialų skirtumo bei įtampos – voltas: $|\mathcal{E}| = \mathrm{V}$.

Elektros srovės šaltinio sukūrimo (kaip ir daugelio fizikos atradimų) istorijoje persipynę atsitiktinumai su dėsningumais. Dėsninga yra tai, kad mokslininkai nuolat skverbiasi į nežinomybės paslaptis, kaupia faktus ir juos nuolat apibendrina. Šiuos pažinimo šuolius (kitaip dar vadinamus atradimais), kurie atveria vis naujus fizikos horizontus, dažnai lemia atsitiktinės palankios aplinkybės.

1780 m. Bolonijos universiteto anatomijos profesorius Luidžis Galvanis (*Galvani*; 1737–1798) tyrinėjo tuo laikotarpiu madingą problemą – elektros poveikį gyvūnams. Vieno eksperimento metu jo asistentas atsitiktinai pastebėjo, kad varlės kojos raumuo susitraukia paliestas skalpeliu, kai netoliese įvyksta elektros iškrova. Šiuo efektu susidomėjęs, Galvanis atliko daugybę įvairių bandymų ir atsitiktinai nustatė, kad nereikalinga netgi iškrova – raumuo susitraukia ir tada, kai jį įvairiose vietose liečia varinis kabliukas ir plieninis skalpelis, o pastarieji liečiasi tarpusavyje, t. y. raumuo ir du skirtingi metalai sudaro uždarą elektros grandinę.

Galvanio tėvynainis italas Aleksandras Volta (*Volta*; 1745–1827), patikrinęs šiuos rezultatus, padarė išvadą, kad minėtą efektą lemia dviejų skirtingų metalų sujungimas į elektros grandinę, o ne varlės koja. Ją galima pakeisti elektrai laidžiu skysčiu ar net juo sudrėkintu skudurėliu. Tuo remdamasis, Volta sukonstravo srovės šaltinį, sudarytą iš vario ir sidabro skritulėlių, atskirtų gabalėliu medžiagos, sudrėkintos druskos tirpalu arba atskiesta rūgštimi (148 pav., *a*). Volta pastebėjo, kad, sudedant tokias elementų poras vieną ant kitos (vienos poros varį suliečiant su kitos poros sidabru), šaltinio įtampa padidėja proporcingai porų skaičiui. Taip atsirado elektros srovės šaltinis (išgarsėjęs visoje Europoje), kuris dėl savo formos buvo pavadintas Voltos stulpu (148 pav., *b*).



148 pav.

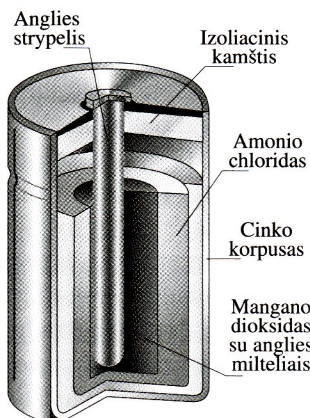
1936 m. vokiečių archeologai, kasinėdami seną gyvenvietę netoli Bagdado, rado keistą prietaisą, kuris (kaip manoma) galėjo būti Voltos stulpo pirmtakas. Molinio indo viduje buvo tuščiaviduris varinis cilindras, o jo centre – asfalto kamščiu įtvirtintas geležinis strypelis. Į tokį indą įpylus acto, vyno ar jūros vandens, prietaisas galėjo tiekti nuo 0,25 V iki 0,5 V įtampos ir nuo 0,5 mA iki 5 mA stiprio elektros srovę (pagaminę šio radinio kopiją, mokslininkai jį išbandė). Nors prietaisas apšvietimui ir netiktų, bet juo galima būtų per keletą valandų elektrolizės (žr. §81) būdu paauksuoti ar pasidabruoti nedidelius juvelyrinius dirbinius. Toks spėjamas elektros elementas, kurio amžius apie 2000 metų, saugomas viename iš Vokietijos muziejų.

Rankiniams elektroniniams laikrodžiams ir skaičiuotuvams dabar gaminami žirnio ir monetos didumo miniatiūriniai elektros elementai. Didesniuose prietaisuose arba vaikiškuose žaisluose naudojami įvairių formų keleto centimetrų didumo elementai, tiekiantys 1,5 V; 4,5 V ir 9 V įtampos nuolatinę elektros srovę, kurios stipris priklauso nuo to, kokios varžos prietaisą prijungiame.

Tokie elektros elementai turi cinko korpusą, atstojantį neigiamąjį elektrodą (149 pav.). Teigiamasis elektrodas – tai mangano dioksidas MnO_2, sumaišytas su grafito milteliais, į kurį įstatomas laidus anglies strypelis. Elektrolitas yra pastos pavidalo amonio chlorido ir alebastro mišinys. Elementui veikiant, cinkas tirpsta elektrolite, o mangano dioksidas virsta hidroksidu MnOOH.

Dvigubai didesnės įtampos elektros šaltinį gauname, kaip ir Voltos stulpe, sujungę vieno elemento anodą su kito elemento katodu į bateriją. Tokie elektros elementai

yra vienkartinio veikimo, nors mangano dioksido virtimo hidroksidu reakcija yra grįžtamoji ir, jeigu cinko korpusas nėra pažeistas, atstatyti mangano dioksidą įmanoma, bet tik naudojant specialią vienos krypties (nuolatinę) elektros srovę.



149 pav.

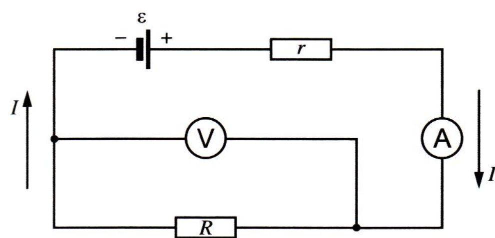
Daugkartinio naudojimo elektros srovės šaltiniai vadinami akumuliãtoriais. Nuo seno naudojami *rūgštìniai (švino) ir šárminiai akumuliãtoriai*, sudaryti iš rūgštyje arba šarme panardintų metalo elektrodų. Pakraunant akumuliatorių (per jį leidžiant elektros srovę), elektrodų paviršiuje vyksta cheminė reakcija, kurios metu elektros energija virsta chemine energija. Akumuliatoriui veikiant kaip elektros srovės šaltiniui, vyksta grįžtamoji cheminė reakcija – cheminė energija virsta elektros energija. Akumuliatoriaus naudingumo koeficientas parodo, kokį procentą pakrovimo metu sunaudotos elektros energijos akumuliatorius grąžina iškrovos metu. Šis koeficientas praktiškai yra lygus 75–80%. Kita svarbi akumuliatoriaus charakteristika – jame sukauptos elektros energijos kiekis, nurodomas ampervalandėmis, pvz., 120 ampervalandžių talpos akumuliatorius tiekia 1 A srovę 120 valandų arba 2 A srovę 60 valandų ir pan.

Akumuliatoriaus įtampa neturi sumažėti žemiau leistinos vertės, nes visai išnaudotas akumuliatorius neatsistato iki pradinės talpos. Kadangi akumuliatorius, kaip ir baterijos, net ir nenaudojami, laikui bėgant savaime išsikrauna, todėl juos patartina laikas nuo laiko pakrauti. Akumuliatoriui išsikraunant, išskaidoma dalis elektrolite esančio vandens, todėl pastovi elektrolito koncentracija palaikoma papildant elektrolitą destiliuotu vandeniu.

Akumuliatoriais gaunama be galo tiksli nuolatinė elektros srovė. Dažniausiai jie naudojami automobilių ir kitų mašinų varikliams paleisti.

Šiuo metu kuriami didelės talpos akumuliatoriai, kurie naudos elektros energiją automobilių transporte vietoj nuolat brangstančio ir teršiančio aplinką benzino ar dujinio kuro.

3. *Kad grandine tekėtų elektros srovė, ji turi būti uždara.* **Paprasčiausią elektros srovės grandinę sudaro elèktros srovė̃s šaltìnis, jungiamíeji laidaĩ, elèktros enèrgijos imtùvai, jungìkliai, srovė̃s ir įtampos matãvimo bei reguliãvimo príetaisai.** Tokia elektros srovės grandinė parodyta 150 paveiksle. Ją sudaro evj šaltinis, kurio varža r, apkrova R, srovės stiprio bei įtampos matavimo prietaisai – *ampermètras ir voltmètras*.



150 pav.

1747 m. Bendžaminas Franklinas paskelbė hipotezę, kad elektros srovė grandinėje teka iš šaltinio teigiamojo poliaus į neigiamąjį, t. y. iš didesnio potencialo taškų į mažesnio potencialo taškus. Praslinkus 150 metų, anglų fizikui Džordžui Tomsonui (*Thomson*) atradus elektroną, paaiškėjo, kad metaluose elektros srovę pernešantys elektronai yra neigiamosios dalelės, judan-

čios priešinga kryptimi. Iš tikrųjų elektronai grandinėje juda nuo šaltinio neigiamojo poliaus, kur yra jų perteklius, link teigiamo poliaus, t. y. priešingai nei sutartoji srovės kryptis. Kadangi nusistovėję fizikos terminai ir įprasta srovės kryptis dėl šio atradimo nebuvo pakeisti, todėl tenka įsidėmėti, kad sutartoji srovės kryptis ir elektronų judėjimo kryptis visada yra priešingos.

Klausimai ir užduotys

1. Ar teka elektros srovė šiais atvejais:

a) sausą dieną susišukavote ir jūsų plaukai pasišiaušia;

b) valgote šokoladą su prilipusiu nedideliu metalinės folijos gabalėliu, folijai palietus plombą, pajuntate dilgtelėjimą;

c) danguje blyksteli žaibas;

d) sodininkas, šienaudamas pievelę, pažeidžia žoliapjovės kabelį; jam einant išjungti elektros maitinimo grandinės, kabelio galai guli ant žemės toli vienas nuo kito.

2. Išvardykite pagrindines sąlygas elektros srovei atsirasti.

3. Apibūdinkite dalelių, sukuriančių elektros srovę metaluose, fizikines savybes.

4. Ką vadiname elektrovara? Kokiais vienetais ji matuojama?

5. Kaip suprantate sąvoką „elektronų dreifas“?

6. Kiek kartų laisvųjų elektronų chaotinio (šiluminio) judėjimo greitis metale skiriasi nuo pėsčiojo greičio?

7. Koks įrenginys buvo pavadintas Voltos stulpu? Kuo jis ypatingas?

8. Apibūdinkite elektros elemento ir akumuliatoriaus ypatumus bei išvardykite jų panašumus bei skirtumus.

9. Kokia kryptimi elektros srovė teka uždaroje grandinėje?

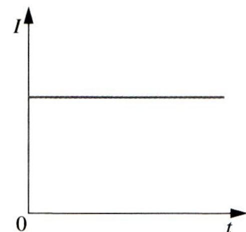
10. Kokia kryptimi dreifuojantys elektronai juda elektros srovės grandinėje?

72. Elektros srovės stipris ir tankis

Išsiaiškinome, kas yra elektros srovė, būtinas sąlygas jai atsirasti ir požymius, pagal kuriuos ji aptinkama, – tai kokybinis elektros srovės apibūdinimas. Dabar bandykime ją įvertinti kiekybiškai, įvesdami fizikinius dydžius, t. y. *elèktros srovẽs stìprio I ir elèktros srovẽs tañkio j* sąvokas bei jų matavimo vienetus.

Elèktros srovẽs stìprio skaitinė vertė lygi krūvio Δq, pratekančio laidininko skerspjūviu per laiko tarpą Δt, ir to laiko tarpo santykiui:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \tag{184}$$



151 pav.

Kai elektros srovės stiprio dydis ir tekėjimo kryptis nekinta, tokia elektros srovė vadinama nuolatinė. Jos grafikas parodytas 151 paveiksle.

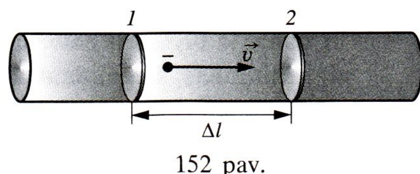
Elektros srovės stiprio matavimo vienetas tarptautinėje SI vienetų sistemoje yra *ampèras*.

Prietaisas elektros srovės stipriui matuoti vadinamas ampermetru ir į grandinę jungiamas nuosekliai, kaip parodyta 150 paveiksle.

Elektros srovės stipris, kaip ir krūvis, yra skaliariniai dydžiai. Priklausomai nuo srovės tekėjimo krypties laidininke srovės stipris gali būti teigiamas ($I > 0$) arba neigiamas ($I < 0$). Susitarta, jog teigiama elektros srovės kryptimi laikoma teigiamųjų elektros krūvių judėjimo (slinkimo) kryptis, nors metaliniuose laidininkuose elektros srovę sudaro laisvųjų elektronų judėjimas priešingai susitartai srovės krypčiai.

Remdamiesi elektronine metalų teorija, bandysime įrodyti elektros srovės stiprio laidininke priklausomybę nuo judančių dalelių krūvio, jų koncentracijos, kryptingo dalelių judėjimo (dreifo) vidutinio greičio ir laidininko skerspjūvio ploto.

Tarkime, kad laidininko (152 pav.) plotas yra S. Vienos dalelės, judančios išilgai laidininko iš skerspjūvio *1* į skerspjūvį *2*, krūvį pažymėsime q_0. Vadinasi, *1* ir *2* skerspjūviais apribotame laidininko tūryje yra $nS\Delta l$ dalelių (n – dalelių koncentracija; $n = \frac{N}{V}$; čia N – dalelių skaičius, V – laidininko tūris).



152 pav.

Remiantis (184) formule, visas elektros kiekis (krūvis) q, pratekantis nagrinėjamu laidininko skerspjūviu S, bus: $q = q_0 nS\Delta l$. Dalelėms judant vidutiniu greičiu $\bar{v}$, visos jos iš *1* laidininko skerspjūvio iki *2* skerspjūvio pratekės per laiką Δt: $\Delta t = \frac{\Delta l}{\bar{v}}$. Tada elektros srovės stiprį pagal 184 formulę išreikšime taip:

$$I = \frac{q_0 nS\Delta l\bar{v}}{\Delta l} = q_0 n\bar{v}S. \qquad (185)$$

Iš šios lygties randame kryptingo elektronų judėjimo laidininke vidutinį greitį: $\bar{v} = \frac{I}{q_0 nS}$.

Kaip žinome, metaluose krūvininkai yra laisvieji elektronai. Bandymais nustatyta, kad laisvųjų elektronų koncentracija metaluose apytiksliai lygi atomų koncentracijai, o elektrono krūvio modulis $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$C. Kai laidininku, kurio skerspjūvio plotas $S = 1\ \text{mm}^2 = 10^{-6}\ \text{m}^2$, teka 1 A stiprio elektros srovė, tai kryptingo elektronų judėjimo vidutinis greitis $\bar{v} = \frac{1\text{A}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}\text{C} \cdot 10^{29}\text{m}^{-3} \cdot 10^{-6}\text{m}^2} \approx 6 \cdot 10^{-5}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Iš čia aiškiai matyti, kad per 1 s elektronai laidininke pasislenka mažiau nei 0,1 mm.

Mažas kryptingo laisvųjų krūvių judėjimo laidininkais vidutinis greitis netrukdo laiku įžiebti elektros lempų, paleisti variklių ir t. t., nes, sujungus elektrinę grandinę, išilgai laidininkų šviesos greičiu plinta elektromagnetinis laukas. Šis laukas priverčia laisvuosius krūvius judėti beveik tuo pačiu metu visuose elektrinės grandinės laidininkuose.

Kitas elektrotechnikoje svarbus fizikinis dydis yra elektros srovės tankis, kurį žymime j. **Elèktros srovė̃s tankiù vadinamas srovės stiprio ir laidininko skerspjūvio ploto santykis**:

$$j = \frac{I}{S}. \qquad (186)$$

Iš šios formulės matyti, kad srovės tankio matavimo vienetas tarptautinėje SI vienetų sistemoje yra: $[j]=\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}^2}$. Pasinaudoję (185) ir (186) formulėmis, gauname elektros srovės tankį, išreikštą mikroskopiniais dydžiais:

$$j = en\bar{v}. \tag{187}$$

Klausimai ir užduotys

1. Senoje elektroninėje skaičiavimo mašinoje kas sekundę iš vieno įrenginio į kitą perduodama 3 · 10⁸ srovės impulsų. Kokio didžiausio ilgio gali būti laidas, jungiantis šiuos įrenginius?

2. Savivarčio sunkvežimio starteris būna įjungtas 5 s ir iš akumuliatoriaus ima 500 A stiprio elektros srovę. Koks krūvis per tą laiką prateka starteriu?

3. Kiek elektronų prateka laidininko skerspjūviu per 1 ns, kai srovės stipris lygus 32 μA?

4. Grandinės dalimi tekanti elektros srovė per 6 s tolygiai sustiprėja nuo 0 iki 1,5 A. Nubraižykite jos stiprio priklausomybės nuo laiko grafiką ir, remdamiesi juo, nustatykite per 6 s laidininko skerspjūviu pratekėjusį elektros krūvį.

5. 100 μF talpos kondensatorius per 0,5 s įkraunamas iki 500 V įtampos. Koks yra vidutinis įkrovos srovės stipris?

6. Laidininku, kurio skerspjūvio plotas lygus 0,5 cm², teka 3 A stiprio elektros srovė. Viename kubiniame centimetre metalo, iš kurio pagamintas laidininkas, yra 4 · 10²² laisvųjų elektronų. Koks jų vidutinis kryptingo judėjimo greitis laidininke?

7. Kokio tankio elektros srovė teka laidininku, kurio skerspjūvio plotas 1,22 mm², kai per 0,4 s juo prateka 6 · 10¹⁸ elektronų?

73. Laidininko elektrinė varža

Pagal metalų elektroninio laidumo teoriją elektros srovę metaluose sudaro tvarkingai judantys laisvieji elektronai. Vienalyčiame elektrostatiniame lauke vakuume jie juda tolygiai greitėdami ($a=\frac{q_0 E}{m}$ const, E – elektrinio lauko stipris). Medžiagoje laisvieji krūvininkai (elektronai) juda beveik tolygiai vidutiniu greičiu $\bar{v}$, nes, susidurdami su jos dalelėmis, dalį savo kryptingo judėjimo energijos (kinetinės) atiduoda toms dalelėms: laisvieji elektronai – metalo jonams, teigiamieji ir neigiamieji jonai – elektrolito molekulėms ir t. t. Tokiu būdu medžiagos dalelės trukdo krūvininkams kryptingai judėti. **Kūno savybė priešintis kryptingam krūvio judėjimui vadinama medžiagos elektrinė varža.** Kuo didesnis yra laisvųjų krūvininkų smūgių skaičius per sekundę, tuo didesnis pasipriešinimas elektros srovei, vadinasi, didesnė ir laidininko elektrinė varža.

Atliekant bandymus, nustatyta, kad laidininko varža R priklauso nuo medžiagos (laidininko) geometrinių matmenų, temperatūros ir jos cheminės sudėties.

Pavyzdžiui, vienalyčio cilindro formos laidininko varža yra tiesiog proporcinga jo ilgiui ir atvirkščiai proporcinga skerspjūvio plotui:

$$R=\rho\frac{l}{S}. \tag{188}$$

Varžos matavimo vienetas tarptautinėje SI vienetų sistemoje yra *òmas* (Ω). **1 Ω – tai varža tokio laidininko, kuriuo tekėdama 1 A stiprio elektros srovė tarp laidininko galų sukuria 1 V potencialų skirtumą.** Praktikoje dažnai sutinkami ir kiti varžos matavimo vienetai: 1 kΩ = 10^3 Ω; 1 MΩ = 10^6 Ω. Kintamosios elektros srovės atveju (188) formule išreikšta laidininko varža yra vadinama ne omine, o *aktyviąja varžà*.

Dydis ρ vadinamas laidininko *savitąja varžà*. Jos skaitinė vertė lygi varžai laidininko, kurio ilgis l = 1 m, o skerspjūvio plotas S = 1 m^2. Savitosios varžos matavimo vienetas – *ommètras*: $[\rho] = \Omega m$. Dažniausiai sutinkamų laidininkų savitosios varžos pateiktos 10 lentelėje.

Elektros grandinės elementai, skirti varžai sudaryti, vadinami vaȓžais, arba rezìstoriais.

Kartais vietoj varžos patogiau yra naudoti kitą atvirkštinį jai fizikinį dydį, vadinamą medžiagos *elektriniù laidumù* σ.

$$\sigma = \frac{1}{R}. \qquad (189)$$

Elektrinio laidumo matavimo vienetas SI vienetų sistemoje vadinamas *sìmensu* ir žymimas S: $[\sigma] = \frac{1}{\Omega} = \Omega^{-1} = S$.

10 lentelė

Savitoji laidininkų varža

Medžiaga	**ρ (Ωm)**	**Medžiaga**	**ρ (Ωm)**
Aliuminis	$2{,}7 \cdot 10^{-8}$	Nichromas	$1{,}05 \cdot 10^{-6}$
Anglis	$(4{,}0\text{–}5{,}0) \cdot 10^{-5}$	Nikelinas	$4{,}2 \cdot 10^{-7}$
Auksas	$2{,}2 \cdot 10^{-8}$	Nikelis	$7{,}3 \cdot 10^{-8}$
Fechralis	$1{,}1 \cdot 10^{-6}$	Sidabras	$1{,}58 \cdot 10^{-8}$
Geležis	$9{,}9 \cdot 10^{-8}$	Švinas	$2{,}07 \cdot 10^{-7}$
Gyvsidabris	$9{,}54 \cdot 10^{-7}$	Varis	$1{,}68 \cdot 10^{-8}$
Konstantanas	$4{,}7 \cdot 10^{-7}$	Volframas	$5{,}3 \cdot 10^{-8}$
Manganinas	$3{,}9 \cdot 10^{-7}$	Žalvaris	$6{,}3 \cdot 10^{-8}$

Klausimai ir užduotys

1. Kaip nustatyti į ritę suvynioto laidininko ilgį neišvyniojant ritės?

2. Elektros instaliacijai sunaudota 200 m varinio laido, kurio skerspjūvio plotas 10 mm². Kokia to laido varža? Kokio skerspjūvio ploto reikėtų analogiško ilgio aliumininio laido, kad jo varža būtų tokio pat didumo?

3. Stačiakampis kontūras, kurio kraštinės a = 1 m ir b = 2 m, padarytas iš 1 mm² skerspjūvio ploto plieninio laidininko. Apskaičiuokite kontūro varžą.

4. Kiek manganinio laido vijų reikia užvynioti ant keraminio ritinio norint gauti 1 Ω varžą? Laido skerspjūvio plotas 0,7 mm², o ritinio pagrindo skersmuo 2 cm.

5. 10 m ilgio plieninio laido galų įtampa 6 V, laisvųjų elektronų koncentracija $4 \cdot 10^{28}$ m^{-3}. Apskaičiuokite elektronų dreifo greitį.

6. Kiek vario reikia 5 km ilgio elektros perdavimo linijai, kurios varža lygi 5 Ω?

7. Kokia yra elektroninio laidumo kūnais tekančios srovės tankio vektoriaus kryptis elektrinio lauko stiprio atžvilgiu?

74. Omo dėsnis grandinės daliai

Sujunkime paprasčiausią elektros srovės grandinę (153 pav.), kurioje $\mathcal{E}$ yra elektros srovės šaltinis, *V* – voltmetras, *A* – ampermetras, *R* – varžynas. Voltmetras, įjungtas tarp taškų *M* ir *N*, rodo grandinės dalies *MARN* įtampą *U*, o ampermetras – nuolatinės srovės stiprį *I*. Kiek kartų padidiname įtampą *U* tarp taškų *M* ir *N*, įjungdami į grandinę naujus elektros srovės šaltinius, tiek pat kartų toje pačioje grandinės dalyje *MARN* padidėja ir srovės stipris *I*. 1827 m. vokiečių fizikas Georgas Omas (*Ohm*; 1789–1854), remdamasis bandymų rezultatais, nustatė, kad tarp įtampos ir srovės stiprio yra toks ryšys: $U = RI$. Šios lygties proporcingumo koeficientas *R* (tai pačiai grandinės daliai *MARN*) yra pastovus dydis ir vadinamas elektrine varža. Šiuo metu pastarąją lygtį priimta rašyti tokia forma: $U = IR$. Iš čia išplaukia, kad įtampa grandinės dalies *MARN* galuose yra lygi elektros srovės stiprio ir toje grandinės dalyje esančios varžos sandaugai. **Sandauga *IR* dažnai vadinama įtampos kritimù varžoje *R*.**

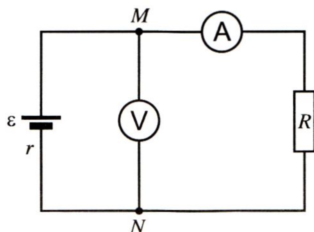
Taigi Omo dėsnį galime užrašyti taip:

$$I = \frac{U}{R}. \tag{190}$$

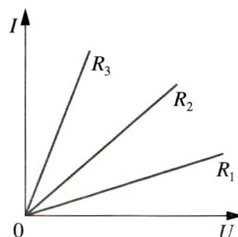
Iš čia išplaukia, kad **elektros srovės stipris grandinės dalyje yra tiesiogiai proporcingas įtampai ir atvirkščiai proporcingas tos grandinės dalies varžai.**

Iš Omo dėsnio išreiškę $R = \frac{U}{I}$ ir įrašę $U = 1$ V, o $I = 1$ A, gauname, kad $R = 1\ \Omega$. Akivaizdu, kad **vienas òmas – tai varža tokio laidininko, kuriuo tekėdama 1 A stiprio elektros srovė tarp jo galų sukuria 1 V įtampą.**

Elektros srovės stiprio priklausomybės nuo įtampos grafikas vadinamas *voltampèrinė laĩdininko charakteristika*. Visų metalinių laidininkų voltamperinės charakteristikos yra tiesės, einančios per koordinačių pradžią (154 pav.).



153 pav.



154 pav.

Kuo mažesnė laidininko varža, tuo stipresnė srovė ir statesnė jos voltamperinė charakteristika ($R_3 < R_2 < R_1$).

Žmogus, evoliucijos eigoje neišsiugdęs nei elektros laukų pojūčio, nei apsaugos nuo jų sistemos, dažnai baiminasi elektros srovės, nors to daryti nereikėtų.

Liaudyje paplitusi nuomonė, jog žmogui pavojinga aukšta įtampa. Tačiau, vilkdamiesi per galvą megztinį – braukdami juo per labai sausus ir švarius plaukus, galime sukurti įtampą tarp megztinio ir žemės iki 10 000 V, o, braukdami kojomis per sausą vilnonį kilimą, savo kūno potencialą galime pakelti net iki 30 000 V. Po to, prisilietę prie žmogaus ar kurio nors kito daikto, pajuntame nemalonų dilgtelėjimą, bet neturime pavyzdžių, kad žmogus būtų nukentėjęs nuo savo įelektrinto megztinio, nes jame susikaupia labai mažas krūvis.

Dažnai matome paukščius, tupinčius ant aukštos įtampos linijos laidų. Žmogus irgi galėtų prisiliesti prie tokio laido, jei neliestų kitų laidų ar daiktų. Elektros srovę sukelia potencialų skirtumas, o izoliuotam kūnui suteiktas labai aukštas potencialas nėra pavojingas. **Pavojų žmogui sukelia jo kūnu tekanti srovė, kuri pagal Omo dėsnį priklauso ne vien nuo įtampos, bet ir nuo varžos (jei kalbame apie žmogų, tai nuo žmogaus varžos).**

Žmogaus kraujas, turintis ištirpusių druskų, yra elektrolitas, todėl kūno varžą daugiausiai lemia odos varža, kuri ypatingai priklauso nuo odos sausumo. Esant labai sausai odai, žmogaus kūno varža (matuojant nuo vienos iki kitos rankos pirštų galų) gali siekti net 500 kΩ. Normalios būsenos žmogaus varža būna 15–100 kΩ. Prakaituojant odoje išsiskiria druskos, todėl, odai sudrėkus, žmogaus kūno varža mažėja ir gali siekti vos 1 kΩ.

Elektros pavojų žmogui lemia trys pagrindiniai veiksniai: kūnu tekančios srovės stipris, jos trukmė ir kūno vieta, kuria teka srovė.

Žmogus pajunta 1 mA stiprio elektros srovę; 5 mA srovė sukelia skausmą, nors dar nėra pavojinga; 10 mA srovė priklausomai nuo žmogaus būsenos gali sutraukti raumenis ir bus neįmanoma atgniaužti pirštų nuo pliko laido; 100 mA srovė yra mirtinai pavojinga, jei ji trunka keletą sekundžių, nes sutrikdo nervų centro, reguliuojančio kvėpavimą ir kitų nervų sistemų veiklą (žinome, kad bet kokie signalai nervais perduodami elektros impulsais). Apie 70 mA elektros srovė, tekėdama per širdį, gali sukelti širdies raumens spazmus, o 1 A stiprio elektros srovė smarkiai nudegina žmogaus kūną. Todėl drėgnomis rankomis draudžiama liesti net 12 V elektros elementų kontaktus. Kita vertus, net 220 V tinklo įtampa nėra pavojinga, jei laidą liesime tik viena ranka, stovėdami su batais ar šlepetėmis ant sausų grindų. Svarbu tuo metu neprisiliesti prie kito laido – radiatoriaus ar vandentiekio vamzdžio, nes pasekmės gali būti nenuspėjamos. Ypač pavojinga remontuoti įjungtus elektros prietaisus.

Pirmoji pagalba elektros nutrenktam žmogui – kuo greičiau, tik ne plikomis rankomis, o su pirštinėmis ar pagaliu nuimti nuo jo kūno laidus ir atlikti dirbtinį kvėpavimą.

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl lygybės $R = \frac{U}{I}$ negalima perskaityti šitaip: „Laidininko varža yra tiesiogiai proporcinga įtampai ir atvirkščiai proporcinga elektros srovės stipriui“?

2. Kodėl pavojus nukentėti nuo elektros srovės priklauso nuo odos švarumo ir sausumo, oro drėgmės ir temperatūros bei žmogaus būklės?

3. Žaibo, trenkusio į medį, srovė gali užmušti žmogų, stovintį po medžiu, nors ir neliečia jo. Kaip tai gali atsitikti? Kaip apsisaugoti nuo tokios srovės?

4. Metalinio laidininko voltamperinė charakteristika yra tiesė. Nuo kokios laidininko savybės priklauso šios charakteristikos polinkio į potencialų skirtumo ašį kampas?

5. Laidininku, kurio varža 30 Ω, per 3 min pratekėjo 90 C elektros krūvis. Kokia buvo šio laidininko galų įtampa?

6. Trijų laidininkų varža atitinkamai lygi 0,7 Ω; 1,0 Ω ir 57,0 Ω. Nubraižykite kiekvieno laidininko voltamperinę charakteristiką.

7. Rezistorius pagamintas iš 15 m ilgio ir 1 mm^2 skerspjūvio ploto nikelininės vielos. Kokio stiprio srovė tekės šiuo rezistoriumi, jeigu jį visą įjungsime į grandinę, o jo gnybtų įtampa bus lygi 12 V?

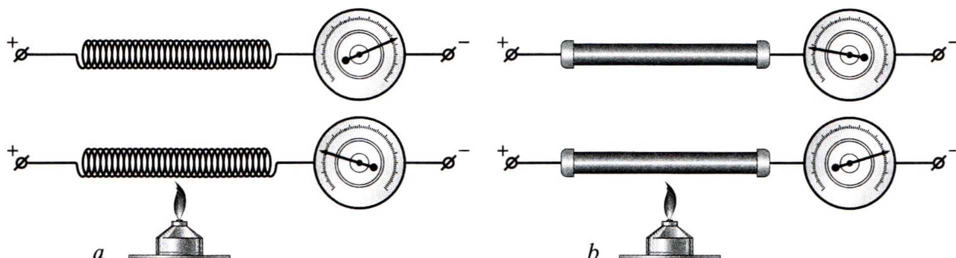
8. 6 m ilgio ir 1,5 mm^2 skerspjūvio ploto laidininkas prijungtas prie 6 V įtampos šaltinio. Laidininku teka 1,5 A stiprio elektros srovė. Apskaičiuokite laidininko elektrinį laidumą.

9. Srovės stipris 1,4 mm^2 skerspjūvio ploto aliumininiame laide lygus 1 A. Apskaičiuokite elektrinio lauko stiprį tame laide.

10. Kokio stiprio elektros srovė tekės žmogaus kūnu, jei jo kūno varža lygi 100 kΩ, palietus pirštais 9 V elemento gnybtus? Ar ši srovė bus jam pavojinga? Kodėl?

75. Laidininko varžos priklausomybė nuo temperatūros. Superlaidumas

Norėdami įsitikinti, ar laidininko varža priklauso nuo temperatūros, pakaitinkime spiritinės lemputės liepsnoje įjungtą į elektros grandinę metalinę spiralę ir tą patį bandymą pakartokime su anglies strypeliu (155 pav.). Pastebėsime, kad (*a*) atveju elektros srovės stipris sumažėjo, o (*b*) atveju – padidėjo. Darome išvadą, kad **laidininko varža priklauso ne tik nuo jo medžiagos ir matmenų, bet ir nuo temperatūros.**



155 pav.

Metaliniuose laidininkuose, kylant temperatūrai, didėja laisvųjų elektronų chaotiško judėjimo greitis (intensyvėja atomų virpesiai, dažnėja elektronų susidūrimai su atomais). Dėl to mažėja elektronų dreifo greitis, o tuo pačiu ir elektros srovės stipris. Vadinasi, tokiame laidininke didėja varža. Visų metalų varža, kylant temperatūrai, didėja.

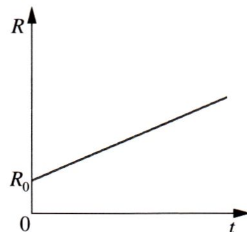
Kylant temperatūrai, anglies, elektrolito ir puslaidininkio tūrio vienete didėja laisvųjų elektringųjų dalelių, todėl minėtų medžiagų varža mažėja. Derinant priešingų savybių medžiagas, galima gauti lydinius, kurių varža beveik nepriklauso nuo temperatūros (kaip antai: konstantanas, manganinas ir kt.). Iš jų gaminamos etaloninės varžos, elektrinių matavimo prietaisų detalės. Reostatams dažniausiai naudojama neizoliuota nikelino viela.

Varžos kitimui nuo temperatūros apibūdinti įvedamas fizikinis dydis, vadinamas *santykiniù varžõs pókyčiu* ir žymimas ε. **Santykiniù varžõs pókyčiu vadinamas varžos pokyčio ΔR ir pradinės varžos R_0 santykis:** $\varepsilon = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R - R_0}{R_0}$; čia R_0 – laidininko varža 0 °C temperatūroje; R – laidininko varža bet kokioje temperatūroje t. Bandymais įrodyta, kad santykinis varžos pokytis yra proporcingas temperatūros pokyčiui: $\varepsilon = \alpha\Delta t$. Kai laidininko pradinė temperatūra $t_0 = 0$ °C, temperatūros pokytis $\Delta t = t - 0 = t$, o proporcingumo koeficientas α vadinamas *laĩdininko varžõs temperatū̃riniu koeficientù*. **Temperatū̃rinis varžõs koeficieñtas parodo santykinį laidininko varžos pokytį temperatūrai pakitus 1°**. Tarptautinėje SI vienetų sistemoje jis matuojamas: $[\alpha] = \mathrm{K}^{-1} = {}^\circ\mathrm{C}^{-1}$.

Pertvarkę aukščiau parašytas formules, gauname

$$R = R_0(1 + \alpha t). \tag{191}$$

Iš šios formulės matyti, kad kaitinamų metalų varža didėja apytiksliai pagal tiesinės priklausomybės dėsnį (156 pav.).



156 pav.

Temperatūrai kintant ne nuo 0 °C, o nuo t_1 iki t_2, temperatūrinis varžos koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę $\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}$.

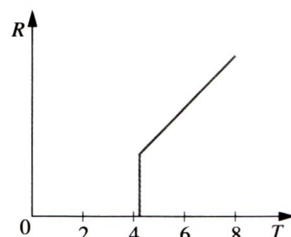
Elektrolitų temperatūriniai varžos koeficientai yra neigiami.

Praktikoje dažniau sutinkamų ir turinčių platesnį pritaikymą medžiagų temperatūriniai koeficientai pateikti 11 lentelėje.

Metalų elektrinė varža didele dalimi priklauso nuo jo kristalinės gardelės būsenos. Teoriškai įrodyta, kad metalai visiškai neturėtų varžos, jei jų gardelės būtų taisyklingos (visi atomai jose būtų tiksliai jų lokalizuotose vietose.

Metalų kristalinės gardelės būna netaisyklingos dėl daugelio priežasčių. Viena iš tokių priežasčių yra šiluminis judėjimas, kuris apsprendžia metalų varžos priklausomybę nuo temperatūros. Pavyzdžiui, mažinant varinio laido temperatūrą, galima daug kartų sumažinti jo varžą. Tačiau, pasiekus žemesnę negu 20 K temperatūrą, vario varža beveik nesumažėja. Panašūs reiškiniai vyksta ir daugelyje kitų metalų. Vadinasi, esant žemoms temperatūroms, nedideli gardelės atomų šiluminiai virpesiai neturi esminės reikšmės metalų varžai. Varža tokiais atvejais priklauso nuo įvairių kristalinės gardelės netaisyklingumų, kuriuos sąlygoja metale esančios priemaišos, aušinamo metalo liejimo metu susidarę netolygumai bei jo apdirbimas.

Tokiu būdu pagal elektroninę metalų laidumo teoriją metalai turi turėti varžą ir absoliučiojo nulio temperatūroje. Tačiau 1911 m., matuojant gyvsidabrio varžą žemų temperatūrų aplinkoje, danų fizikas Heikė Kamerling-Onas (*Kamerlingh-Onnes*) atrado reiškinį, kurio nebuvo galima paaiškinti elektronine metalų laidumo teorija. Kol temperatūra buvo aukštesnė negu 4,12 K, gyvsidabrio varža, panašiai kaip ir kitų metalų, buvo gerai pastebima. Pasiekus temperatūrą 4,12 K, gyvsidabrio varža išnyko ir, temperatūrai toliau mažėjant, išliko lygi nuliui (157 pav.). Atšaldytu stikliniame kapiliare gyvsidabrio stulpeliu tekėjo srovė, nors įtampa tarp stulpelio galų buvo lygi nuliui. Tai rodo, kad gyvsidabrio varža lygi nuliui. **Reiškinys, kuriam esant tam tikroje temperatūroje išnyksta laidininko varža, vadinamas superlaidumù**, o **temperatūra, žemiau kurios laidininkas netenka varžos, vadinama krìtine temperatūrà.** Švino kritinė temperatūra – 7,2 K, gyvsidabrio – 4,1 K, alavo – 3,7 K, aliuminio – 1,14 K, cinko – 0,79 K.



157 pav.

Įdomu tai, kad superlaidumo būvio laidininkai praleidžia labai stiprią srovę ir patys neįšyla. Superlaidžiame žiede arba uždaroje ritėje kartą sužadinta elektros srovė teka beveik nesilpnėdama metus ir ilgiau. 1 mm^2 skerspjūvio ploto švinine viela, jos net neįšildydama, gali tekėti 1000 A – 1250 A stiprio elektros srovė. Superlaidininkais elektros srovė teka neprarasdama energijos. Elektromagnetais, kurių apvija suvyniota iš superlaidininko, sukuriami labai stiprūs ir stabilūs magnetiniai laukai.

Ne visi laidininkai pereina į superlaidžią būseną – varis, auksas, sidabras, platina, kad ir kaip šaldomi, nevirsta superlaidininkais.

Superlaidumo reiškinio tyrimai labai svarbūs mokslui, nes padeda pažinti daugelį naujų medžiagos savybių ir atveria didžiules perspektyvas elektrotechnikai ir elektronikai.

Superlaidumą tiria žemų temperatūrų fizika. Šiuo metu fizikai sprendžia problemą, kaip sukurti superlaidžias medžiagas normalioje temperatūroje. 1987 m. Šveicarijoje, Prancūzijoje ir buvusioje Sovietų Sąjungoje susintetintos keraminės medžiagos, kurios pereina į superlaidžią būseną esant 90 K – 250 K temperatūrai, t. y. vos 23 laipsniais žemiau 0 °C. Unikalūs superlaidininkai sukels perversmą daugelyje technikos sričių, todėl artimiausioje ateityje laukiama svarbių mokslo, technikos ir ekonomikos rezultatų.

11 lentelė

Temperatūriniai varžos koeficientai

Laidininkas	**α (K^{-1})**	**Laidininkas**	**α (K^{-1})**
Sidabras	0,0041	Volframas	0,0046
Varis	0,0043	Nikelinas	0,0003
Aliuminis	0,0042	Manganinas	0,000015
Cinkas	0,0039	Konstantanas	0,00005
Plienas	0,0050	Nichromas	0,0003
Švinas	0,0041	Gyvsidabris	0,00027
Platina	0,0025		

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl, temperatūrai didėjant, metalinių laidininkų varža didėja?

2. Ką vadiname superlaidumu?

3. Kokia kritinės temperatūros fizikinė prasmė?

4. Kodėl kaitinamųjų lempų uždegimo srovė yra stipresnė už darbinę srovę?

5. Varinės elektromagneto apvijos varža, kai temperatūra 20 °C, lygi 2 Ω. Palaikius vielą ilgesnį laiką įjungtą, varža padidėjo iki 2,4 Ω. Iki kokios temperatūros įkaito apvija?

6. Tekanti elektros srovė įkaitino geležinę vielą iki 250 °C, dėl to jos varža padidėjo dvigubai. Apskaičiuokite geležies temperatūrinį varžos koeficientą.

7. Kiek kartų elektros srovė, tekanti lemputės volframiniu siūleliu jos įjungimo momentu, būna stipresnė už srovę, tekančią tuo siūleliu, įkaitusiu iki 2400 °C?

8. Termoelementui gaminti naudojama konstantaninės vielos sruoga, kurios masė 89 g, o skerspjūvio plotas 0,1 mm^2. Apskaičiuokite šio termoelemento varžą esant 100 °C temperatūrai.

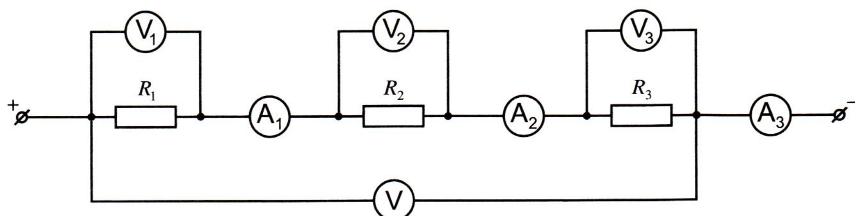
9. 5 m ilgio vielos galų potencialų skirtumas 4,2 V. Apskaičiuokite 120 °C temperatūros viela tekančios elektros srovės tankį. Vielos savitoji varža 2 · 10^{-7} Ωm, o temperatūrinis varžos koeficientas lygus 6 · 10^{-3} K^{-1}.

10. Termoporai gaminti imamas konstantano vielos gabalas, kurio masė 89 g, o skerspjūvio plotas 0,10 mm^2. Kokia bus jos varža 100 °C temperatūroje?

76. Elektros imtuvų jungimo būdai

Išorinė elektros grandinė daugeliu atvejų yra sudaryta iš įvairios paskirties elementų: elektros imtuvų, naudojančių elektros energiją, jungiamųjų laidų, matavimo ir valdymo prietaisų. Vienas svarbiausių elektrotechnikos uždavinių – kaip juos tarp savęs sujungti, kad būtų galima apskaičiuoti tokiose grandinėse veikiančias įtampas, tekančios elektros srovės stiprį ir pilnutinę (ekvivalentinę) grandinės varžą.

Naudojami du elektros imtuvų jungimo būdai: *nuoseklùsis ir lygiagretùsis*. Nuosekliai jungiant laidininkus, pirmojo jų galas sujungiamas su antrojo pradžia; antrojo galas – su trečiojo pradžia ir t. t. Taip sujungta elektros srovės grandinė neturi išsišakojimų (158 pav.). Elektros srovės stipris, įtampa ir ekvivalentinė varža apskaičiuojami remiantis toliau išvardytomis taisyklėmis.



158 pav.

1. **Nuosekliai sujungtoje grandinėje elektros srovės stipris bet kurioje jos dalyje yra toks pats, nes kiekvieno laidininko skerspjūviu per laiko vienetą prateka vienodas elektros krūvio kiekis.** Krūviams judant atliekamas darbas, eikvojama energija, bet patys krūviai niekur nedingsta ir nesikaupia, todėl $I_1 = I_2 = I_3 = I = \text{const}$.

2. Tarkime, kad kiekvieno elemento, įjungto į elektros srovės grandinę, varža atitinkamai lygi R_1, R_2, R_3. Remiantis Omo dėsniu grandinės daliai, įtampų kritimus šiose varžose užrašome taip: $U_1 = IR_1$; $U_2 = IR_2$; $U_3 = IR_3$. Vieną lygybę padaliję iš kitos, gauname: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$.

Iš šios formulės išplaukia, kad **nuoseklaus elektros imtuvų jungimo grandinėje atskirų dalių įtampos tiesiogiai proporcingos jų varžoms.** Norėdami šį teiginį patikrinti praktiškai, prijungiame voltmetrą lygiagrečiai kiekvienam grandinės elementui.

3. Pagal grandinėje įjungtų voltmetrų parodymus ir energijos tvermės dėsnį įsitikiname, kad bendra grandinės įtampa lygi atskirų dalių įtampų sumai: $U = U_1 + U_2 + U_3$.

4. Pilnutinei (ekvivalentinei) grandinės varžai apskaičiuoti į įtampų sumos formulę įrašykime įtampų reikšmes, gautas panaudojant Omo dėsnį grandinės daliai. Tą matematinį reiškinį suprastinkime iš elektros srovės stiprio (nes jis yra pastovus) ir gausime, kad **nuosekliai sujungtų laidininkų pilnutinė grandinės varža lygi atskirų laidininkų varžų sumai:**

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \qquad (192)$$

Nuosekliai sujungus n laidininkų, kurių varžos yra vienodos ir lygios R_1, pilnutinė grandinės varža bus:

$$R = nR_1. \qquad (193)$$

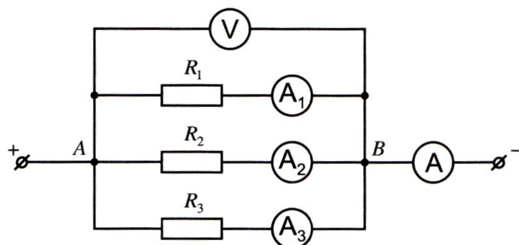
Akivaizdžiai matome, kad, *laidininkus jungiant nuosekliai, pilnutinė grandinės varža padidėja.*

Į elektros srovės grandinę nuosekliai jungiami ampermetrai, jungikliai, reostatai, iš nuosekliai sujungtų lempučių sudarytos eglutės girliandos. Jeigu turimo šaltinio įtampa elektros imtuvui per didelė, ją galima sumažinti nuosekliai įjungus kitą imtuvą. Grandinei nutrūkus bent vienoje vietoje (pvz., perdegus vienam elementui), elektros srovė nutrūksta visoje nuosekliai sujungtoje grandinėje.

Lygiagrečiuoju jungimu vadiname tokį elektros srovės grandinės elementų jungimą, kai vieni jų gnybtai jungiami į vieną mazgą, o kiti – į kitą (159 pav.). Tarp šių grandinės mazgų sudaromos atskiros šakos.

Išsiaiškinsime esmines taisykles lygiagretaus jungimo grandinės parametrams apskaičiuoti.

1. Pagal grandinėje įjungtų prietaisų parodymus matyti, kad **visų lygiagrečiai sujungtų grandinės šakų įtampa yra vienoda:** $U_1 = U_2 = U_3 = U = \text{const}$.



159 pav.

2. Darome išvadą, kad **į mazgą įtekančių ir iš jo ištekančių elektros srovių sumos yra lygios** (grandinės mazguose A ir B elektros krūviai kauptis negali). Šį teiginį užrašome taip: $I = I_1 + I_2 + I_3$.

3. Remdamiesi Omo dėsniu grandinės daliai, galime užrašyti atskirų grandinės dalių įtampas: $I_1R_1 = I_2R_2 = I_3R_3$. Iš čia išplaukia, kad $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$. Vadinasi, atskiromis grandinės šakomis tekančių elektros srovių stipriai yra atvirkščiai proporcingi tų dalių varžoms.

4. Pilnutinei elektros srovės grandinės varžai apskaičiuoti į srovių stiprių sumos formulę įrašome jos išraišką iš Omo dėsnio grandinės daliai: $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$. Kadangi įtampa U = const, tai, iš jos padaliję abi lygties puses, gauname:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \quad \text{arba} \quad \sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3. \qquad (194)$$

Lygiagrečiai sujungtos grandinės elektrinis laidumas yra lygus atskirų šakų laidumų sumai.

Kai visų lygiagrečiai sujungtų n elementų varžos R_1 yra vienodos, tai išsišakojusios grandinės pilnutinė varža

$$R = \frac{R_1}{n}. \qquad (195)$$

Iš pastarųjų lygčių matyti, kad *laidininkus (rezistorius) jungiant lygiagrečiai, pilnutinė grandinės varža mažėja.*

Į elektros srovės tinklą lygiagrečiai jungiami beveik visi energijos imtuvai – elektros varikliai, apšvietimo lempos, buitiniai elektros prietaisai, nes jų darbui reikalinga pastovi tinklo įtampa. Taip sujungti imtuvai nepriklauso vienas nuo kito, nes, išjungus vieną ar kelis imtuvus, įtampa kitose šakose nepakinta.

Naudojamas ir mišrusis grandinės dalių jungimas, kai kelios lygiagrečiai sujungtų imtuvų grupės tarpusavyje jungiamos nuosekliai. Taip sujungtų elektros srovės grandinių parametrai apskaičiuojami taikant nuoseklaus ir lygiagretaus jungimo taisykles.

Klausimai ir užduotys

1. Nuosekliai sujungtos grandinės srovės stipris visur vienodas. Kodėl nevienodas elektronų dreifo greitis?

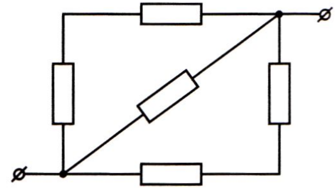
2. Kodėl lygiagrečiai sujungtų rezistorių pilnutinė varža mažesnė už kiekvieno jų varžą?

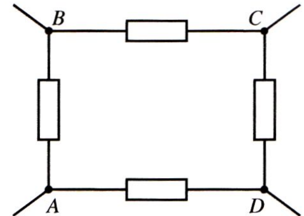
3. Kaip sujungtos Kalėdų eglutę puošiančios elektros lemputės, jeigu, vienai iš jų perdegus, visos užgęsta? Kodėl?

4. Kaip įjungti į radijo transliavimo tinklą garsiakalbiai, jeigu, vieną išjungus, kiti veikia? Kodėl?

5. Elektros grandinę sudaro n vienodų lygiagrečiai sujungtų rezistorių, kurių kiekvieno varža R_1. Apskaičiuokite grandinės varžą.

6. Kokios varžos rezistorių ir kaip reikia prijungti prie 24 Ω varžos laidininko, norint gauti 20 Ω varžą?





7. Kaip reikia sujungti tris rites, kurių kiekvienos varža 10 Ω, norint gauti 15 Ω varžą?

8. Viršutiniame brėžinyje pavaizduota elektros srovės grandinės dalies schema. Čia kiekvienos kvadrato kraštinės ir įstrižainės varža lygi 8 Ω. Jungiamųjų laidų varžos nepaisykite. Apskaičiuokite pilnutinę šios grandinės dalies varžą.

9. Apatiniame brėžinyje keturi vienodos varžos (po 10 Ω) rezistoriai sujungti taip, kaip parodyta paveiksle. Kokia bus pilnutinė grandinės varža, kai įtampos šaltinį įjungsime tarp taškų *A* ir *D*? *A* ir *C*?

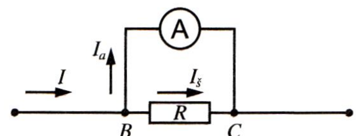
77. Elektros srovės stiprio ir įtampos matavimas

Elektros grandinių veikimui kontroliuoti į jas įjungiami įvairūs matavimo prietaisai, pavyzdžiui, *ampermètrai* ir *voltmètrai*. *Į grandinę įjungtas matavimo prietaisas turi būti taip sukonstruotas, kad nepakeistų grandine tekančios elektros srovės stiprio ir įtampos.* Todėl matavimo prietaisų varžoms keliami tam tikri reikalavimai: ampermetrų (jie į grandinę jungiami nuosekliai) varžos turi būti kuo mažesnės, o voltmetrų (jie į grandinę jungiami lygiagrečiai) varžos – kuo didesnės, kad nepakeistų grandinės dalies varžos.

Dažniausiai praktikoje naudojamų ampermetrų varža apytiksliai lygi 0,1 Ω–0,01 Ω, o voltmetrų – 1000–3000 Ω ir daugiau.

Dauguma elektros prietaisų reaguoja į jais tekančią elektros srovę, vadinasi, pagal savo prigimtį jie yra prietaisai elektros srovės stipriui matuoti – ampermetrai. Voltmetro rodyklės nukrypimas didesniu ar mažesniu kampu priklauso nuo elektros srovės, tekančios voltmetru. Žinodami voltmetro varžą ir juo tekančios srovės stiprį, galime apskaičiuoti įtampą tarp voltmetro gnybtų ($U = IR$). Sužymėję prietaiso skalėje taip apskaičiuotas įtampas, turėsime sugraduotą voltmetrą. Tačiau padalas voltmetro skalėje priimta žymėti pagal standartinio voltmetro parodymus.

Gaminant kiekvieną matavimo prietaisą, jis apskaičiuojamas tik tam tikram maksimaliausiam elektros srovės stipriui. Todėl kiekvienu konkrečiu matavimo prietaisu galima matuoti elektros srovės stiprį ar įtampą iki tam tikros maksimalios ribos. Yra ampermetrų, skirtų matuoti srovėms iki 1 A, 5 A, 10 A, 50 A ir t. t.; yra taip pat ir voltmetrų, skirtų įvairioms įtampoms matuoti. Tačiau kiekvieno prietaiso matavimų intervalą galima ir praplėsti. Pavyzdžiui, turime ampermetrą, apskaičiuotą srovėms iki 5 A, o reikia matuoti elektros srovės stiprius iki 10 A. Tuo tikslu lygiagrečiai ampermetrui prijungsime laidininką *BC* (160 pav.), kurio varža apskaičiuota taip, kad iš bendros 10 A stiprio elektros srovės 5 A tekėtų ampermetru, o kiti 5 A – laidininku *BC*. Toks laidininkas vadinamas *šuntù*. Nagrinėjamame pavyzdyje šunto var-



160 pav.

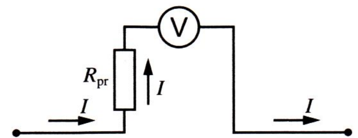
ža turi būti lygi ampermetro varžai. Jeigu norėtume tą patį ampermetrą pritaikyti srovės stipriui iki 20 A matuoti, turėtume imti šuntą, kurio varža būtų tris kartus mažesnė už ampermetro varžą. Tada 20 A elektros srovė pasiskirstytų taip: 5 A tekėtų ampermetru, o 15 A – šuntu. Jeigu, pavyzdžiui, ampermetru su tokiu šuntu teka 2 A stiprio elektros srovė, tai grandinėje teka srovė, kurios stipris lygus 8 A. Šiuo atveju dėl šuntavimo ampermetro padalos vertė padidėjo keturis kartus.

Šunto varžą lengva apskaičiuoti prisiminus, kaip pasiskirsto elektros srovės stipris lygiagrečiai sujungtuose laidininkuose.

Tarkime, kad I_a ir $I_š$ yra ampermetru ir šuntu tekančios srovės, o R_a ir $R_š$ – ampermetro ir šunto varžos. Tada $\frac{I_a}{I_š} = \frac{R_š}{R_a}$ (*a*). Grandine tekanti elektros srovė $I = I_a + I_š$. Iš šios lygties išreiškę šuntu tekančios elektros srovės stiprį, gausime: $I_š = I - I_a$ (*b*). Į *a* lygybę įrašę šuntu tekančią srovę, išreikštą *b* lygybe, gauname: $\frac{I_a}{I - I_a} = \frac{R_š}{R_a}$. Iš šios lygties galima sužinoti šunto varžą:

$$R_š = R_a\left(\frac{I_a}{I - I_a}\right). \tag{196}$$

Norint išplėsti voltmetro matavimo ribų intervalą ir pritaikyti jį didesnėms įtampoms, negu jis yra skirtas matuoti, reikia nuosekliai jam prijungti kitą (tam tikros varžos) laidininką, vadinamą *priešvarže*. Priešvaržės varžą lengva apskaičiuoti. Išnagrinėkime tokį pavyzdį. Tarkime, turime voltmetrą, skirtą 10 V įtampai matuoti, o reikia matuoti įtampą iki 100 V. Jeigu šį voltmetrą prijungtume prie grandinės dalies, kurios įtampa lygi 100 V, tai prietaisas perdegtų, nes juo pratekėtų elektros srovė, 10 kartų stipresnė už srovę, leistiną tekėti voltmetru. Prietaisui turi tekti įtampa, ne didesnė kaip 10 V, o likusieji 90 V turi tekti priešvaržei R_{pr}, prijungtai nuosekliai voltmetrui (161 pav.).



161 pav.

Kadangi nuoseklaus jungimo atveju atskirų grandinės dalių įtampos yra proporcingos tų dalių varžoms, tai priešvaržės varžą randame pasinaudoję proporcija $\frac{R_{pr}}{R_v} = \frac{100 - 10}{10}$, kurioje R_v – voltmetro varža.

Iš čia $R_{pr} = 9\,R_v$ arba

$$R_{pr} = R_v\frac{U - U_v}{U_v}. \tag{197}$$

Vadinasi, šiuo atveju voltmetro priešvaržės varža turi būti devynis kartus didesnė už paties voltmetro varžą. Voltmetro su tokia priešvarže padalos vertė bus dešimt kartų didesnė už pagrindinės skalės padalos vertę.

Eksperimentiniams darbams daugiausia gaminami universalūs prietaisai su šuntų ir priešvaržių komplektu. Tokiais prietaisais galima matuoti tiek elektros srovės stiprį, tiek ir labai įvairaus dydžio įtampas. Pavyzdžiui, naudojant skirtingus šuntus, vienu prietaisu galima matuoti sroves nuo 1 mA iki 1000 A stiprio. Analogiškai platus ir matuojamų įtampų diapazonas.

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl ampermetro negalima jungti lygiagrečiai su energijos imtuvu?

2. 0,4 Ω varžos ampermetro matavimo riba yra 2 A. Ar galima ją padidinti iki 10 A? Paaiškinkite, kaip tai padaryti.

3. Kokią priešvaržę reikia prijungti prie galvanometro norint 20 kartų sumažinti jo jautrį? Galvanometro varža 950 Ω.

4. 0,9 Ω varžos ampermetru, apskaičiuotu 10 A stiprio elektros srovei, reikia išmatuoti srovės stiprį iki 100 A. Priešvaržei naudojama 0,28 mm^2 skerspjūvio ploto geležinė viela. Kokio ilgio ji turi būti?

5. Voltmetro varža 400 Ω, matavimo riba 4 V. Ką reikia daryti norint tuo voltmetru matuoti įtampą iki 36 V? Atsakymą pagrįskite.

6. Kiek kartų padidės voltmetro skalės viršutinė riba, jeigu prie jo nuosekliai prijungsime papildomą rezistorių, kurio varža 9 kΩ? Laikykite, kad paties voltmetro varža lygi 1000 Ω.

7. Ampermetro matavimo riba – 2 A. Kaip ją galima padidinti iki 10 A? Ampermetro vidinė varža lygi 0,4 Ω.

8. Voltmetro varža 400 Ω, matavimo riba 4 V. Ką reikia daryti norint matuoti tuo voltmetru įtampą iki 36 V?

78. Nuolatinės elektros srovės darbas ir galia. Džaulio ir Lenco dėsnis

Elektros srovės atliktas darbas yra ne kas kita, kaip elektrinio lauko jėgų, stumiančių krūvius grandine, darbas. Kiekvienoje grandinėje būtinai vyksta dvejopas energijos virsmas.

Elektros energija, kurią suteikia krūviams srovės šaltinis, išorinėje grandinės dalyje virsta kitų rūšių energija: elektros varikliuose – mechanine, šildymo prietaisuose – šilumine, apšvietimo lempose – šilumine ir šviesos energija, įkraunamuose akumuliatoriuose – chemine energija.

Elektros energijos kiekis, kuris išorinėje grandinės dalyje virsta kitų rūšių energija, yra lygus elektros srovės darbui.

Kadangi elektros srovės darbas yra ne kas kita, kaip elektrinio lauko jėgų darbas, tai jį, remiantis § 65 ir § 66 žiniomis, nesunkiai galime apskaičiuoti.

Žinome, kad darbą, atliktą perkeliant krūvį elektriniame lauke, apibūdiname perkeltojo krūvio didumo ir potencialų skirtumo (arba įtampos tarp perkėlimo kelio pradžios ir galo taškų) sandauga: $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$, arba $A = qU$.

Pirmąją šių lygybių galime pritaikyti ir elektros srovės darbui apskaičiuoti. Apie pratekėjusio krūvio didumą galime spręsti iš grandine tekančios srovės stiprio ir tekėjimo laiko, nes $q = It$.

Pasinaudoję šiomis lygtimis ir matematiškai jas pertvarkę, gauname formulę, išreiškiančią elektros srovės darbą grandinės, kurios įtampa yra U, dalyje:

$$A = IUt. \qquad (198)$$

Nuolatinės elektros srovės darbas grandinės dalyje yra lygus tos dalies įtampos, grandine tekančio elektros srovės stiprio ir jos tekėjimo laiko sandaugai.

Jeigu elektros srovę išreiškiame amperais, įtampą – voltais ir laiką – sekundėmis, tai darbas bus išreikštas džauliais: $[A] = 1A \cdot 1V \cdot 1s = 1J$.

Norint bandymu nustatyti elektros srovės darbą, reikia naudotis ampermetro, voltmetro ir laikrodžio parodymais. Gaminami ir specialūs prietaisai elektros srovės darbui matuoti – *elèktros enèrgijos skaitìkliai.*

198 formulė yra universali. Taikant ją, apskaičiuojamas visas elektros srovės darbas nepriklausomai nuo to, kokios rūšies energija grandinėje virto elektros energija – šilumine, mechanine ar chemine.

Taikydami Omo dėsnį, 198 formulėje galime srovę ar įtampą pakeisti kitais elektriniais dydžiais ir gausime dar dvi ekvivalenčias darbo formules:

$$A = \frac{U^2}{R}t \quad \text{arba} \quad A = I^2Rt. \tag{199}$$

Šios dvi formulės taikomos tada, kai žinoma energijos imtuvo varža R ir jo įtampa U arba juo tekančios elektros srovės stipris I. Kadangi laidininkų varža sukelia pasipriešinimą srovės tekėjimui grandinėje, tai elektros energija virsta tik vidine (šilumine) energija. Šio reiškinio analogas mechanikoje – kinetinės energijos virtimas vidine energija veikiant trinties jėgoms. Todėl pagal 199 formules apskaičiuojame tik tą elektros energijos dalį, kuri R varžos imtuve virsta šilumine energija. Jeigu imtuvas yra šiluminis prietaisas, tai šis darbas A bus visas elektros energijos sąskaita atliktas darbas. O jeigu nagrinėjamas imtuvas – elektros variklis ar įkraunamas akumuliatorius, tai pagal 199 formules rasime tik tą elektros energijos dalį, kuri eikvojama variklio ar akumuliatoriaus laidininkams šildyti. Duotu atveju tai bus šiluminiai nuostoliai.

Tekant elektros srovei, laidininkas šyla. Kai, be šilimo, kitokių kitimų laidininke nevyksta, pagal energijos tvermės dėsnį, **šilumos kiekis, išsiskiriantis laidininke, yra lygus per tą patį laiką sunaudotai elektros srovės energijai.**

1841 m. anglų mokslininkas Džeimsas Preskotas Džaulis (*Joule*; 1818–1889) ir 1842 m. rusų mokslininkas Emilijus Lencas (1804–1865), atlikdami eksperimentus nepriklausomai vienas nuo kito, nustatė elektros srovės šiluminį veikimą ir suformulavo dėsnį, pagal kurį **šilumos kiekis, išsiskiriantis grandinės dalyje tekant elektros srovei, yra tiesiogiai proporcingas srovės stiprio kvadratui, tos dalies varžai ir elektros srovės tekėjimo laikui.**

Pažymėję šilumos kiekį, išsiskiriantį laidininke, raide Q, Džaulio ir Lenco dėsnį užrašome formule

$$Q = I^2Rt. \tag{200}$$

Šį dėsnį patikriname atlikdami tokį bandymą: vieline spirale, panardinta į kalorimetrą, kuriame yra skysčio (pvz., vandens), leiskime tekėti elektros srovei. Spiralė įšils ir kartu sušildys kalorimetre esantį skystį. Apskaičiavę, kokį šilumos kiekį gavo kalorimetras ir jame esantis skystis, ir palyginę su rezultatais, gautais pagal prietaisų parodymus, įsitikinsime, kad šilumos kiekio ir darbo skaitinės reikšmės yra lygios. Apibendrindami galime teigti, kad Džaulio ir Lenco dėsnis išreiškia energijos tvermę tuo atveju, kai elektros energija virsta laidininko ir aplinkinių kūnų vidine energija.

Laidininko įšilimą tekant elektros srovei galima paaiškinti elektronine teorija. Žinome, kad, tekant nuolatinei srovei, laidininko viduje egzistuoja elektrinis laukas. Šio lauko veikiami elektronai juda ir įgyja tam tikrą kinetinę energiją. Susidūrę su kristalinės gardelės jonais, elektronai atiduoda jiems dalį savo kinetinės energijos, ir jonų šiluminis judėjimas pasidaro intensyvesnis. Po smūgio elektronai, veikiami elektrinio lauko, vėl įgyja kinetinės energijos ir t. t. Dėl šios priežasties padidėja laidininko vidinė energija – laidininkas šyla.

Kiekvienas gamykloje pagamintas elektrinis prietaisas turi techninį pasą, kuriame nurodyta jo *galià*. Nusipirkę paprasčiausią elektros lemputę, ant jos taip pat randame užrašytą galios didumą, pagal kurį sprendžiame, kaip ryškiai švies lemputė ir kiek kainuos jos naudojimas.

Galià – tai fizikinis dydis, kurio skaitinis didumas lygus atlikto darbo ir laiko, per kurį jis atliktas, santykiui. Pažymėję elektros srovės galią raide P, o laiką – t, galime parašyti:

$$P = \frac{A}{t}. \quad (201)$$

Iš šios lygties matyti, kad *elektros srovės galia apibūdina darbo atlikimo spartą*. Tarptautinėje SI vienetų sistemoje ji matuojama *vãtais* žymaus Didžiosios Britanijos inžinieriaus, garo mašinos išradėjo 1782 m. Džeimso Vato (1736–1819) garbei $[P] = \frac{1\text{J}}{1\text{s}} = 1\text{ W}$. **1 W – tai galia tokio elektros imtuvo, kuriame kas 1 sekundę 1 J elektros energija virsta kitų rūšių energija.** Praktikoje dažnai naudojami ir kartotiniai vato vienetai: *kilovãtai, hektovãtai, megavãtai*. 1 kW = 10^3 W; 1 hW = 10^2 W; 1 MW = 10^6 W.

Į galios formulę įrašę darbo išraiškas (198 ir 199), gausime kitokias galios formulės išraiškas:

$$P = IU; \quad P = \frac{U^2}{R}; \quad P = I^2R. \quad (202)$$

Remiantis viena iš šių formulių, galima teigti, kad matavimo vieneto vato dimensija gali būti ir tokia: 1 W = 1 A · 1 V.

Elektros srovės galią galima išmatuoti naudojantis ampermetro ir voltmetro parodymais arba specialiu prietaisu – *vatmetrù*.

Iš 201 formulės matyti, kad elektros srovės darbo išraiška gali būti ir tokia:

$$A = Pt. \quad (203)$$

Žinodami, kad elektros srovės galia matuojama vatais, o darbas – džauliais, pagal (203) lygtį gauname dar vieną matavimo vienetą, vadinamą *vatsekùnde* (W · s): 1 J = = 1 W · 1 s.

Elektrotechnikoje srovės darbui (sunaudotai elektros energijai) matuoti naudojami elektros srovės skaitikliai. Skaitikliai srovės darbą (sunaudotą elektros energijos kiekį) matuoja kilovatvalandėmis (kWh) ir jį automatiškai registruoja. Dar vartojami elektros energijos vienetai *vãtvalandė* (Wh), *hektovãtvalandė* (hWh) ir *megavãtvalandė* (MWh):

1 Ws = 1 J;	1 Wh = 3 600 J;	1 MWh = 3,6 · 10^9 J;
1 kWh = 3,6 · 10^6 J;	1 hWh = 3,6 · 10^5 J.	

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl, sujungiant laidus, jie ne tik susukami vienas su kitu, bet ir sulituojami?

2. Dvi vienodo skersinio pjūvio ploto ir vienodo ilgio vielos, viena – nikelininė, o kita – aliumininė, nuosekliai įjungtos į tą pačią grandinę. Kurioje vieloje išsiskirs daugiau šilumos ir kiek kartų daugiau?

3. Dvi vienodo skerspjūvio ploto ir ilgio vielos, viena – geležinė, o antra – varinė, lygiagrečiai įjungtos į grandinę. Palyginkite šiose vielose išsiskyrusį šilumos kiekį.

4. Kodėl, elektros srovei tekant laidais ir elektros lemputės siūleliu, siūlelis įkaista iki baltumo, o laidai beveik neįšyla, nors laidais ir lemputės siūleliu teka tokio pat stiprio srovė?

5. Kodėl elektrinės krosnelės ir laidynės spiralės neperdega, nors jose visą laiką išsiskiria šiluminė energija?

6. Jeigu vandens šildymo prietaisą ištrauksime iš vandens, neišjungę jo iš tinklo, tai prietaisas greitai perdegs. Kodėl?

7. Kodėl lydžiuosiuose saugikliuose naudojama švininė viela, o kaitinamosiose lempose – volframinis siūlas?

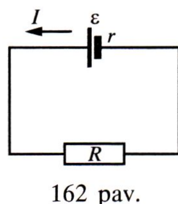
8. Automobilio generatoriaus varža 0,56 Ω, jo gnybtų įtampa 12 V. Nustatykite, kokį darbą per 10 h atlieka elektros srovė išorinėje grandinėje.

9. Dvi lempos, apskaičiuotos vienodai įtampai, bet vartojančios skirtingą galią, įjungtos į tinklą nuosekliai. Kodėl viena jų šviečia ryškiau? Kuri? Atsakymą pagrįskite.

10. Automobilio starterio galia 5,9 kW, jo gnybtų įtampa 12 V. Kokio stiprio srovė teka įjungiamo starterio apvija?

79. Omo dėsnis uždarai grandinei

Išnagrinėsime elektrinę grandinę, sudarytą iš elektros srovės šaltinio, imtuvo (elektros lempos) ir jungiamųjų laidų (162 pav.). R – imtuvo varža; $\mathcal{E}$ – šaltinio evj; r – srovės šaltinio varža. Jungiamųjų laidų varža labai maža, todėl jos galima nepaisyti.



162 pav.

Uždarą elektros grandinę sudaro dvi iš esmės skirtingos dalys: *išorìnė ir vidìnė grandìnės. Išorinė grandinės dalis – visa tai, kas prijungta prie šaltinio gnybtų.* Ši grandinės dalis naudoja elektros energiją – joje elektros energija virsta kitų rūšių energija. Išorinės grandinės varža vadinama *išorinė varžà* ir žymima R.

Vidinė grandinės dalis yra paties elektros srovės šaltinio vidus – laidininkai, kuriais juda elektringosios dalelės šaltinio viduje. Galvaniniame elemente – tai elektrolitas ir elektrodai, generatoriuje – inkaro apvija ir t. t. Šioje grandinės dalyje kitų rūšių energija virsta elektros energija. Vidinės grandinės dalies varža vadinama *vidinė varžà* ir žymima r.

Elektros srovės šaltinyje tik jam būdingos rūšies energija nenutrūkstamai virsta elektros energija. Galvaniniame elemente toji pirminė energija yra cheminė, generatoriuje – mechaninė, termoelemente – šiluminė ir kt. Neelektrinės kilmės jėgų veikiami,

elektronai šaltinio viduje juda priešinga elektrostatinio lauko jėgų kryptimi – iš teigiamojo šaltinio poliaus į neigiamąjį. Šaltinio gnybtuose kaupiasi priešingų ženklų krūviai ir palaiko pastovų potencialų skirtumą. Neelektrinės kilmės jėgos, veikiančios šaltinyje, vadinamos *pašalìnėmis jėgomìs*.

Vadinasi, energijos šaltinis, kaip ir kiekvienas laidininkas, turi varžą, kurioje susidaro įtampos kritimas.

182 paveiksle pavaizduotoje elektrinės grandinės schemoje tekančios elektros srovės stipris vienodas visose nagrinėjamos grandinės dalyse. Pažymėję U_1 – įtampos kritimą imtuve ir U_2 – įtampos kritimą šaltinio viduje, pagal Omo dėsnį grandinės daliai galime parašyti, kad $U_1 = IR$, $U_2 = Ir$. Tada įtampos kritimų uždaros grandinės dalyse suma bus lygi:

$$U_1 + U_2 = I(R + r). \qquad (204)$$

Kai elektros energijos šaltinio įtampa matuojama esant atvirai grandinei, tai ji lygi įtampos kritimų atskirose uždaros grandinės dalyse sumai ir yra to šaltinio elektrovara.

Pažymėję evj raide $\mathcal{E}$, galime užrašyti:

$$\mathcal{E} = U_1 + U_2. \qquad (205)$$

Remdamiesi 204 ir 205 lygybėmis, gauname, kad $\mathcal{E} = I(R + r)$. Iš šios lygties išplaukia, kad

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}. \qquad (206)$$

Ši lygybė – tai matematiškai išreikštas Omo dėsnis uždarai grandinei.

Uždara grandine tekančios elektros srovės stipris yra tiesiogiai proporcingas šaltinio elektrovarai ir atvirkščiai proporcingas pilnutinei grandinės varžai.

Kiekvieno šaltinio elektrovara yra pastovus dydis, nepriklausantis nuo to, iš ko sudaryta grandinė, į kurią tas šaltinis įjungiamas. Tačiau įtampos kritimas išorinėje grandinėje $U = IR$ – svarbiausia elektrovaros dalis – anaiptol nėra pastovus dydis, būdingas tam elektros srovės šaltiniui (įtampos kritimas išorinėje grandinėje kartais vadinamas elektros srovės šaltinio gnybtų įtampa).

Pagal Omo dėsnį uždarai grandinei galime užrašyti, kad $IR = \mathcal{E} - Ir$ arba $U = \mathcal{E} - Ir$.

Į pastarąją formulę įrašę matematinę Omo dėsnio išraišką, gauname: $U = \mathcal{E} - \frac{\mathcal{E}r}{R+r}$. Ją pertvarkę, turime tokią išraišką: $U = \mathcal{E}\left(1 - \frac{r}{R+r}\right)$.

Iš šios formulės darome išvadą: kuo didesnė išorinės grandinės dalies varža R, lyginant su grandinės vidine varža r, tuo mažiau šaltinio gnybtų įtampa skiriasi nuo jo evj. *Didžiausia šaltinio gnybtų įtampos reikšmė lygi elektrovarai.* Ją gausime tada, kai išorinės grandinės varža bus be galo didelė. Tai gali būti tik tada, kai elektros srovės grandinė yra atvira. Prijungus voltmetrą prie šaltinio gnybtų, kai elektros grandinė yra atvira, voltmetro rodoma įtampa bus lygi evj.

Mažinant išorinę varžą, grandine tekančios elektros srovės stipris didės, tuo tarpu gnybtų įtampa mažės ir gali kristi iki nulio. Tai atsitiks tada, kai išorinė varža sumažės

iki nulio. Toks atvejis technikoje vadinamas *trumpúoju jungimù*. Trumpojo jungimo metu elektros srovės šaltinis grandinei teikia maksimalią srovę $I_{max} = \frac{\mathcal{E}}{r}$, nes $R = 0$. Akivaizdžiai matome, kad **trumpojo jungimo metu elektros srovės stipris priklauso ne vien nuo šaltinio evj, bet ir nuo jo vidinės varžos.** Galvaninių elementų vidinė varža pakankamai didelė, todėl jų trumpojo jungimo srovės nebūna stiprios. Visai kitaip su akumuliatoriais – jų vidinė varža maža (maždaug 0,1 Ω–0,01 Ω), todėl jų trumpojo jungimo elektros srovė būna labai stipri ir gali suardyti akumuliatoriaus plokštes. Labai pavojingi trumpieji jungimai grandinėse, kurias maitina galingi elektrinių generatoriai. Jų įtampa nėra maža (127 V, 220 V ir didesnė), todėl trumpojo jungimo srovė būna ganėtinai stipri ir dėl to nutrūksta (išsilydo) laidai. Šaltinis ar net imtuvas gali sugesti ir atsiranda didelis pavojus kilti gaisrui. Norint viso to išvengti, grandinėse naudojami *elèktros saugìkliai*.

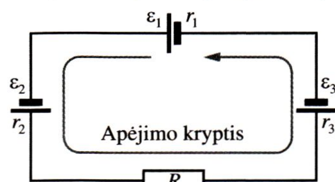
Jeigu vieno šaltinio (galvaninio elemento, akumuliatoriaus) tiekiamos elektros srovės arba įtampos imtuvui nepakanka, tada į bateriją jungiami keli šaltiniai. Elektros srovės šaltiniai tarpusavyje jungiami tais pačiais būdais, kaip ir imtuvai – nuosekliai arba lygiagrečiai.

Tais atvejais, kai reikia padidinti įtampą, elementai jungiami nuosekliai, t. y. vieno elemento teigiamasis gnybtas jungiamas su kito elemento neigiamuoju gnybtu. Baterijos, sudarytos iš n vienodų evj $\mathcal{E}_1$, elektrovara yra n kartų didesnė už vieno elemento evj $\mathcal{E}_1$, t. y. $\mathcal{E} = n\mathcal{E}_1$. Be to, n kartų padidėja ir baterijos vidinė varža: $r = nr_1$. Prijungus prie tokios baterijos išorinę grandinę, kurios varža R, elektros srovės stipris pagal Omo dėsnį bus lygus:

$$I = \frac{U}{R + nr_1}. \qquad (207)$$

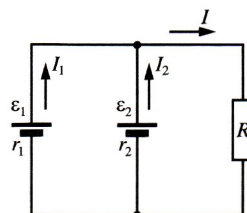
Norint nustatyti bet kurio šaltinio evj ženklą, reikia iš pradžių sąlygiškai pasirinkti teigiamą kontūro apėjimo kryptį.163 paveiksle teigiamąja (laisvai pasirinkta) kryptimi laikoma priešinga laikrodžio rodyklei kryptis.

Kai grandinę apeiname nuo neigiamojo šaltinio poliaus prie teigiamojo ($\mathcal{E} > 0$), tai pašalinės jėgos šaltinio viduje atlieka teigiamą darbą. Kai grandinę apeiname nuo teigiamojo šaltinio poliaus prie neigiamojo, evj yra neigiama ($\mathcal{E} < 0$) ir pašalinės jėgos šaltinio viduje atlieka neigiamą darbą. 163 paveiksle pavaizduotos grandinės atveju, kai kontūrą apeiname priešinga laikrodžio rodyklei kryptimi, elektrovara $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_1| - |\mathcal{E}_2| + |\mathcal{E}_3|$.



163 pav.

Kai $\mathcal{E} > 0$, tai pagal 206 formulę srovės stipris $I > 0$, t. y. srovės kryptis sutampa su pasirinkta kontūro apėjimo kryptimi. Kai $\mathcal{E} < 0$, tai elektros srovės kryptis yra priešinga pasirinktai kontūro apėjimo krypčiai ($I < 0$). Pilnutinė grandinės varža R_p lygi visų varžų sumai: $R_p = R + r_1 + r_2 + r_3$.



164 pav.

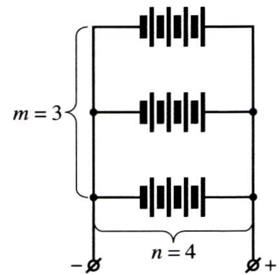
Lygiagrečiai (164 pav.) šaltiniai jungiami tada, kai imtuvams reikia stipresnės srovės, negu ją gali tiekti vie-

nas šaltinis. Paprastai parenkami šaltiniai, kurių evj yra lygios: $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}$. Tuomet tuščiosios eigos metu, kai imtuvas atjungtas, šaltinių kontūru elektros srovė neteka: $\frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}}{r_1 + r_2} = 0$. Pageidautina, kad lygiagrečiai sujungti šaltiniai būtų apkrauti proporcingai kiekvieno jų galiai $P = \mathcal{E}I$. Kitaip tariant, didesnės galios šaltinis imtuvui turėtų tiekti stipresnę srovę. Šaltinių įtampą U galima apskaičiuoti šitaip: $\mathcal{E} - I_1r_1 = \mathcal{E} - I_2r_2$. Matome, kad $\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1}{r_2}$.

Iš čia galime suformuluoti tokias lygiagrečiai sujungtų evj šaltinių proporcingo apkrovos paskirstymo sąlygas: 1) *evj turi būti lygios*; 2) *elektros šaltinių vidinės varžos turi būti atvirkščiai proporcingos jų galioms*. Jei šios sąlygos netenkinamos, šaltiniai apkraunami neproporcingai jų galiai: vienas perkraunamas, o kitas apkraunamas nepakankamai.

Sujungus lygiagrečiai m elementų, t. y. sujungus jų vienavardžius polius, baterijos evj nepadidėja – lieka tokia, kaip vieno elemento, tačiau m kartų sumažėja baterijos vidinė varža: $r = \frac{r_1}{m}$. Grandinės, kurioje įjungta tokia baterija, elektros srovės stipris bus:

$$I = \frac{\mathcal{E}_1}{R + \frac{r_1}{m}}. \quad (208)$$



165 pav.

Norint gauti reikiamą įtampą ir reikiamą elektros srovės stiprį, dažnai derinami nuoseklusis ir lygiagretusis jungimo būdai – elementai į bateriją jungiami mišriai. Jeigu bateriją sudaro m lygiagrečių šakų, kurių kiekvienoje nuosekliai sujungta po n elementų (165 pav.), tai grandine tekančios srovės stipris bus apskaičiuojamas pagal formulę

$$I = \frac{n\mathcal{E}_1}{R + \frac{nr_1}{m}}. \quad (209)$$

Klausimai ir užduotys

1. Nuo ko priklauso evj ženklas Omo dėsnio formulėje uždarai grandinei?

2. Kodėl, jungiant galvaninius elementus lygiagrečiai, baterijos evj nedidėja?

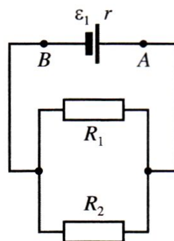
3. Šeši elementai, kurių kiekvieno evj 1,1 V ir vidinė varža 3 Ω, sujungti nuosekliai po du į tris lygiagrečias grupes. Kokio stiprio elektros srovė teka išorine grandine, kurios varža 2 Ω?

4. Prie generatoriaus, kurio elektrovara 80 V, o vidinė varža 0,2 Ω, prijungtas 0,5 Ω varžos suvirinimo aparatas. Jungiamųjų laidų varža 0,1 Ω. Apskaičiuokite grandine tekančios elektros srovės stiprį, suvirinimo aparato gnybtų įtampą, trumpojo jungimo elektros srovę.

5. Baterija, kurios elektrovara lygi 6 V ir vidinė varža 1,4 Ω, tiekia elektros srovę dviem lygiagrečiai sujungtiems imtuvams, kurių varžos 2 Ω ir 8 Ω. Kokia yra baterijos gnybtų įtampa ir kokio stiprio elektros srovė teka imtuvais?

6. Generatoriaus varža yra *n* kartų mažesnė už išorinę varžą. Kurią dalį generatoriaus elektrovaros sudaro jo gnybtų įtampa?

7. Ampermetras, kurio varža 2 Ω, prijungtas prie baterijos gnybtų, rodo 5 A stiprio elektros srovę. Voltmetras, kurio varža 150 Ω, prijungtas prie tos pačios baterijos, rodo 12 V. Kokia būtų trumpojo jungimo elektros srovė?



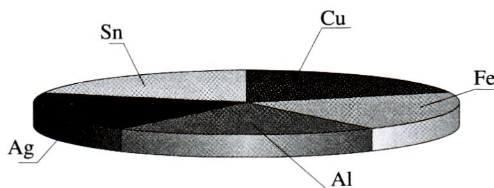
80. Termoelektriniai reiškiniai

1821 m. vokiečių fizikas Tomas Zėbekas (*Seebeck*; 1770–1831) atrado šiluminės energijos virtimo elektros energija reiškinį.

Šiluminei energijai tiesiogiai virstant elektros energija, susikuria elektros srovė, vadinama termosrovè, o du tarpusavyje sujungti skirtingų medžiagų laidininkai vadinami termoelementù. Laidininkai, sudarantys termoelementą, vadinami termoelektròdais.

Sulietus du skirtingus metalus, tarp jų susidaro potencialų skirtumas, vadinamas *kontãktiniu potenciãlų skir̃tumu*, kurio didumas priklauso nuo susilietusių metalų. Jie gali būti nuo kelių dešimtųjų volto iki kelių voltų.

Sudarę grandinę iš kelių nuosekliai sujungtų skirtingo metalo elementų, pastebėsime, kad tos grandinės galų potencialų skirtumas bus toks pats, kaip ir potencialų skirtumas, kuris susidaro tarp kraštinių grandinės elementų, sujungus juos tiesiog vieną su kitu. Ir jeigu kraštiniai elementai bus to paties metalo, tai galų potencialų skirtumas bus lygus nuliui. Vadinasi, uždaroje grandinėje, sudarytoje iš eilės skirtingų metalų elementų, jei visų metalų temperatūra vienoda (166 pav.), elektros srovė neatsiranda.



166 pav.

Aptarkime priežastis, dėl kurių susidaro potencialų skirtumas. Laisvieji elektronai metaluose juda netvarkingai įvairiais greičiais. Kai kurie greičiausiai judantys elektronai išlekia iš metalo į aplinką ir arti laidininko paviršiaus sudaro elektronų debesėlį. Todėl metale atsiranda teigiamųjų krūvių, o jo išorėje arti paviršiaus – neigiamųjų krūvių perteklius. Tarp elektroninių dujų metale ir elektronų debesėlio išorėje nusistovi dinaminė pusiausvyra. Išlėkdamas iš metalo į vakuumą, elektronas atlieka vadinamąjį išlaisvinimo darbą A likusiųjų krūvių traukai nugalėti, todėl jo kinetinė energija sumažėja. Lėtai judantys elektronai, kurių kinetinė energija mažesnė už išlaisvinimo darbą, negali palikti metalo. Be to, elektrono išlaisvinimo darbas priklauso nuo metalo prigimties, jo paviršiaus būvio, temperatūros ir išorinio elektrinio lauko stiprio.

Elektronų trūkumas metale ir jų perteklius gaubiančioje aplinkoje abiejose paviršiaus pusėse sudaro ploną dvigubą elektrinį sluoksnį, kuris primena labai ploną plokščią kondensatorių. Jo storis siekia vos kelis tarpatominius atstumus ($d \approx 10^{-8}$ cm). Iš metalo išlekiantys elektronai turi įveikti sulaikantį dvigubo sluoksnio elektrinį lauką.

Potencialų skirtumas dvigubo sluoksnio elektriniame lauke $\Delta\varphi$ vadinamas kontãktiniu potenciãlų skir̀tumu tarp metalo ir gaubiančios aplinkos:

$$\Delta\varphi = \frac{A}{q_e}. \tag{210}$$

Šioje formulėje A – elektrono išlaisvinimo darbas, q_e – elektrono krūvio absoliutusis didumas. Elektrono išlaisvinimo darbas matuojamas elektronvoltais, o metalų jis svyruoja kelių elektronvoltų ribose.

Norint pašalinti elektroną iš metalo, reikia atlikti darbą nugalint jėgas, kurios traukia jį atgal į metalą. Šis darbas yra ne kas kita, kaip elektronų išlaisvinimo iš metalo paviršiaus darbas A.

Metale esančio elektrono potencinė energija yra mažesnė už iš metalo išlėkusio elektrono potencinę energiją dydžiu, lygiu išlaisvinimo darbui. Dėl to tarp taško, esančio visai prie pat metalo paviršiaus, ir vidinės metalo srities susidaro potencialų skirtumas.

Susilietus dviem metalams (geležiai ir variui), kurių vidinių sričių potencialai skirtingi, laisvieji elektronai pereina (difunduoja) pro kontakto vietą iš metalo, kuriame elektronų energija yra didesnė, į kitą metalą, kuriame jų energija mažesnė. Dėl tokio elektronų perėjimo vienas metalas įsielektrina teigiamai, o kitas – neigiamai, ir tarp šių metalų paviršių susidaro kontaktinis potencialų skirtumas. Tarp įsielektrinusių metalų paviršių atsiras kontaktinis elektrinis laukas, kuris stabdys tolesnį elektronų judėjimą iš geležies į varį ir skatins priešingą srautą. Kontaktiniam potencialų skirtumui pasiekus tam tikrą vertę, nusistovės dinaminė pusiausvyra: per sekundę elektronų, perėjusių iš geležies į varį skaičius bus lygus elektronų skaičiui, kurie, veikiami elektrinio lauko jėgų, judės priešinga kryptimi. Tarp metalų susidarys pastovus potencialų skirtumas.

Jeigu abiejų geležies ir vario kontaktų temperatūra vienoda, kontaktiniai potencialų skirtumai negali sukurti grandinėje elektros srovės, nes kontaktų vietose potencialas yra vienodo dydžio, o elektriniai laukai vienas kitą kompensuoja. Jeigu vieną kontaktą pašildysime, tai elektronų difuzija jame paspartės ir susidarys didesnis kontaktinis potencialų skirtumas negu kitame žemesnės temperatūros kontakte. Atstojamojo elektrinio lauko stipris šiuo atveju nebus lygus nuliui, taip atsiras kontaktinė termoelektrovara ir uždara grandine tekės elektros srovė. Ji stiprėja kontaktų vietose didėjant temperatūros skirtumui.

Pagrindinė priežastis, dėl kurios susidaro kontaktinis potencialų skirtumas dviejų metalų riboje, yra skirtingas elektronų išlaisvinimo iš tų metalų darbas. Metalas, kurio elektronų išlaisvinimo darbas yra mažesnis, įsielektrina teigiamai, nes iš jo daugiau elektronų pereina į tą metalą, kurio elektronų išlaisvinimo darbas didesnis. Pastarasis įsielektrina neigiamai. Pažymėję išlaisvinimo darbus A_1 ir A_2, šį potencialų skirtumą galėsime užrašyti taip:

$$\Delta\varphi_{12} = \frac{A_1 - A_2}{q_e}; \tag{211}$$

čia q_e – elektrono krūvio absoliutusis didumas.

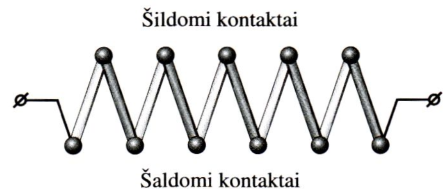
Kita priežastis kontaktiniam potencialų skirtumui atsirasti yra skirtinga laisvųjų elektronų koncentracija besiliečiančiuose metaluose. Elektronai pereina iš metalo, kuriame jų koncentracija didesnė, į metalą, kuriame jų koncentracija mažesnė.

Italų fizikas, vienas iš elektros srovės teorijos kūrėjų, pirmasis išradęs galvaninį elementą, Aleksandras Volta 1795 m. nustatė tokius kontaktinio potencialų skirtumo dėsnius: 1) **kontaktinis potencialų skirtumas tarp sujungtų dviejų skirtingo metalo laidininkų priklauso tik nuo jų prigimties ir temperatūros;** 2) **nuosekliai sujungus kelis skirtingo metalo laidininkus, esančius vienodoje temperatūroje, kontaktinis potencialų skirtumas tarp jų galų nepriklauso nuo tarpinių metalų prigimties; jis lygus sujungtų kraštinių laidininkų kontaktiniam potencialų skirtumui.** Todėl, sudarius iš dviejų skirtingų metalų, esančių toje pačioje temperatūroje, uždarą grandinę, elektros srovė netekės.

Nors termoelektrovara, susidariusi kontaktų vietoje, nėra didelė (maždaug 0,001 V esant temperatūros skirtumui 100 K), tačiau šiuolaikiniais prietaisais ji gana tiksliai išmatuojama. Todėl termoelementus galima naudoti temperatūrai matuoti prijungus galvanometrą ir jo skalę sugradavus temperatūros laipsniais.

Termoelementais, kurių elektrodai pagaminti iš sunkiai besilydančių metalų, galima matuoti labai aukštas temperatūras aukštakrosnėse, šiluminių elektrinių garo įrenginiuose, gamyklose ir mokslinėse laboratorijose. Šiais prietaisais galima ne tik matuoti, bet ir automatiškai reguliuoti temperatūras, nes termoelemento elektrinį signalą nesunku sustiprinti ir panaudoti reikiamai aparatūrai valdyti. Analogiškai tokiais prietaisais galima matuoti ir labai žemas temperatūras, kuriose visi skysčiai užšąla.

Nuosekliai sujungus n termoelementų, gaunama *šiluminė batèrija* (167 pav.), kurios jautrumas n kartų didesnis už vieno elemento jautrumą. Termobaterija su jautriu galvanometru galima matuoti milijonąsias laipsnio dalis. Tai leidžia aptikti degančios žvakės šilumą už kelių kilometrų, nustatyti žvaigždės šviesos intensyvumą arba temperatūrų skirtumą (Mėnulio atvaizde tarp apšviesto ploto ir šešėlio). Jautrios termobaterijos įrengiamos *šiluminiuose pelengãtoriuose* – t. y. aparatuose, skirtuose šilumą skleidžiantiems objektams (pvz., lėktuvams) aptikti iš didelio nuotolio.



167 pav.

Gaminami mikroskopinio dydžio termoelementai, skirti temperatūrai matuoti tarp labai artimų taškų (kadangi šiluminis laidumas labai mažas, matuojamo objekto temperatūra nekeičiama).

Kadangi puslaidininkinių termoelementų naudingumo koeficientas didesnis už metalinių ir siekia apie 15%, tai juos galima jungti į baterijas ir naudoti kaip šiluminius elektros srovės generatorius – termogeneratorius.

Pagal šilumos šaltinį termogeneratoriai skirstomi į saulės, atominius ir dujinius, o pagal paskirtį – į kosminius, jūrinius ir kt. Jie neturi judamųjų dalių, juos nesudėtinga prižiūrėti, o jų galia siekia iki kelių šimtų kilovatų. Termogeneratoriuose pagamintą elektros energiją naudoja automatiniai švyturiai, retransliatoriai, dirbtiniai Žemės palydovai ir kiti kosminiai aparatai.

Klausimai ir užduotys

1. Apskaičiuokite termoelektrovarą, susidariusią šiluminiame elemente, kurio kontaktai įkaitinami iki 300 °C.

2. Elektriniame virdulyje 1,8 l vandens per 22,5 min įkaista nuo 10 °C iki 100 °C. Apskaičiuokite virdulio kaitinamojo elemento varžą. Virdulys jungiamas į 120 V įtampos tinklą, o jo našumo koeficientas lygus 80%. Kokio stiprio elektros srovė teka kaitinamuoju elementu?

3. Kokią didžiausią traukos jėgą išvysto elektrinis traktorius, judėdamas 2 km/h greičiu, jeigu jo elektros varikliu teka 360 A stiprio elektros srovė, o jo gnybtų įtampa lygi 470 V? Traktoriaus variklio naudingumo koeficientas lygus 72%.

4. Iš 6 m ilgio nikelininės vielos pagamintas kaitintuvas, tekant 5 A elektros srovei, per 14 min įkaitina 1,5 l vandens, pakeldamas jo temperatūrą 84 °C. Apskaičiuokite laido skersmenį. Energijos nuostolių nepaisykite.

5. Į 46 g masės aliumininį kalorimetrą įpilta 180 g vandens ir įleista 2 Ω varžos spiralė, prijungta prie 4,8 V įtampos šaltinio. Keliais laipsniais įšils vanduo per 5 min? Energijos nuostolių nepaisykite.

6. Kiek įšils 18 mm^2 skerspjūvio ploto aliumininis laidas per 20 s tekant 3 A elektros srovei, jei visa išsiskirianti energija bus eikvojama tik laidui šildyti?

12 SKYRIUS. ELEKTROS SROVĖ ĮVAIRIOSE APLINKOSE

81. Elektros srovė skysčiuose. Elektrolizės dėsnis. Elektrolizės taikymas technikoje

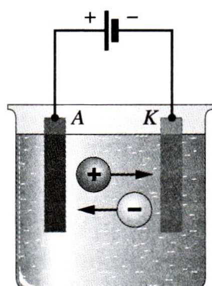
Visi skysčiai pagal jų elektrinį laidumą skirstomi į: *dielèktrikus* (distiliuotas vanduo); *laĩdininkus* (elektrolitų – rūgščių, šarmų ir druskų – tirpalai bei lydalai); *skystúosius pùslaidininkius* (išlydytas selenas, sulfidų lydalai ir kt.).

Kai elektrolitus veikia vandens polinių molekulių elektrinis laukas, jų molekulės suskyla į jonus. Šis procesas vadinamas elektrolìtine disociãcija.

Disociacijos laipsnis (į jonus suskilusių ištirpusios medžiagos molekulių dalis) priklauso nuo temperatūros, tirpalo koncentracijos ir tirpiklio dielektrinės skvarbos ε. Kylant temperatūrai, disociacijos laipsnis didėja, vadinasi, didėja ir teigiamųjų bei neigiamųjų jonų koncentracija.

Susitikę **įvairių ženklų jonai gali vėl susijungti į neutraliąsias molekules – rekombinúotis**. Nekintant sąlygoms, tirpale nusistovi **dinãminė pusiáusvyra – per sekundę į jonus suskylančių molekulių skaičius pasidaro lygus skaičiui jonų porų, kurios per tą patį laiką vėl susijungia į neutraliąsias molekules.**

Elektrolitų vandeniniuose tirpaluose arba lydaluose elektros krūvį perneša teigiamieji ir neigiamieji jonai.





$CuSO_4 \rightarrow Cu^{2+} + SO_4^{2-}$;



$NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$.

168 pav.

Indą su elektrolito tirpalu įjungus į elektrinę grandinę (168 pav.), teigiamieji jonai slenka neigiamojo elektrodo link, o neigiamieji – teigiamojo elektrodo link. Pasiekę elektrodus, jie tampa molekulėmis.

Elektros srovės stipris elektrolite yra proporcingas įtampai tarp elektrodų (galioja Omo dėsnis). *Elektrolitą šildant, jo klampa mažėja.* Todėl didėja jonų greitis, kartu ir joninis elektrinis laidumas.

Su oksidacijos ir redukcijos reakcijomis susijusių medžiagų nusėdimas ant elektrodų vadinamas elektrolizė.

Elektrolizės metu ant elektrodo išsiskyrusios medžiagos masė m lygi vieno jono masės m_{0j} ir per laiką Δt elektrodą pasiekusių jonų skaičiaus N_j sandaugai: $m = m_{0j}N_j$ (a). Jono masė apskaičiuojama pagal formulę: $m_{0j} = \frac{M}{N_A}$ (b); čia M – molio masė, N_A – Avogadro skaičius. Iš čia gauname, kad elektrodą pasiekusių jonų skaičius $N_j = \frac{\Delta q}{q_{0j}}$ (c), čia $\Delta q = I\Delta t$ – tai krūvis, pratekantis elektrolitu per laiką Δt; q_{0j} – jono krūvis, kurį apsprendžia atomo valentingumas n ($q_{0j} = nq_e$, q_e – elementarusis krūvis). Disocijuojant iš vienvalenčių atomų sudarytoms molekulėms ($n = 1$), atsiranda vieną krūvį turintys jonai, pavyzdžiui, disocijuojant kalio bromido molekulei, gaunama: $KBr \rightarrow K^+ + Br^-$. Vario sulfato molekulės disocijavimo metu susidaro du krūvius turintys jonai, nes vario atomai šiame junginyje yra dvivalenčiai ($n = 2$).

Į a lygtį įrašę b ir c išraiškas bei atsižvelgę į tai, kad $\Delta q = I\Delta t$ ir $q_{0j} = en$, gauname:

$$m = \frac{M}{neN_A} I\Delta t. \qquad (212)$$

Įvesime proporcingumo koeficientą k – medžiagos elektrocheminį ekvivalentą, kuris lygus $k = \frac{M}{neN_A}$.

Elektrochèminis ekvivaleñtas skaitiniu didumu lygus medžiagos masei, kuri išsiskiria pratekant elektrolitu 1 C krūviui. Jis priklauso nuo medžiagos rūšies.

Įvedus elektrocheminio ekvivalento sąvoką, 212 lygtį galima užrašyti ir tokiu pavidalu:

$$m = kI\Delta t, \quad \text{arba} \quad m = k\Delta q. \qquad (213)$$

Tai matematinė pirmojo elektrolizės dėsnio išraiška.

Kiekybinius santykius tarp perėjusio per elektrolitą elektros krūvio ir ant elektrodų išsiskyrusio medžiagos kiekio 1834 m. eksperimentais nustatė anglų mokslininkas

Maiklis Faradėjus (*Faraday*; 1791–1867). Kruopščiai pasvėręs katodą prieš ir po elektrolizės bei išmatavęs elektros srovės stiprį ir jos tekėjimo laiką, Faradėjus nustatė, kad **elektrolizės metu išsiskyrusios medžiagos masė yra tiesiogiai proporcinga elektros srovės stipriui ir jos tekėjimo laikui.**

Antrasis Faradėjaus dėsnis teigia, kad **medžiagų elektrocheminiai ekvivalentai proporcingi jų cheminiams ekvivalentams**:

$$k = \frac{1}{F}\frac{M}{n}; \qquad (214)$$

čia M – elemento molio masė; n – valentingumas; F – Faradėjaus skaičius (F = = 96 484 C/mol). **Faradėjaus skaičius skaitiniu didumu lygus krūviui, kuriam pratekėjus elektrolitu, ant elektrodų išsiskiria medžiagos masė, lygi jo cheminiam ekvivalentui.**

Iš elektrolizės bandymų, atliktų su skirtingų rūšių druskomis, paaiškėjo, jog, praleidus elektrolitu 96 484 C elektros kiekį, ant elektrodų išsiskiria vienas molis bet kokios vienvalentės medžiagos.

Žinodami, kad viename molyje bet kokios medžiagos yra vienodas atomų (arba jonų) skaičius $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23} \text{mol}^{-1}$ (Avogadro skaičius), galime rasti vienvalenčio jono krūvį e: $e = \frac{F}{N_A} = \frac{96\,484 \text{ C/mol}}{6{,}023 \cdot 10^{23} \text{ l/mol}} = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C. Šis minimalus jono krūvis yra lygus elektrono krūviui, apskaičiuotam ir kitais metodais. Toks sutapimas patvirtina idėją apie minimalaus elektros krūvio egzistavimą. *Visi elektros krūviai yra minimalaus (elementariojo) krūvio kartotiniai.*

Elektrolizės teoriją 1805 m. sukūrė ir paskelbė Teodoras Grotusas (1785–1822), ilgą laiką gyvenęs ir dirbęs Gedučiuose (Pakruojo rajonas). Jis įvedė fizikinius terminus „teigiamasis polius“, „neigiamasis polius“ bei įrodė, kad molekulės yra dipoliai ir gali poliarizuotis. T. Grotusas buvo vienas iš fizikinės chemijos mokslo pradininkų Lietuvoje.

Elektrolizės reiškinys plačiai taikomas šiuolaikinėje gamyboje.

Daugelyje įmonių veikia galvaniniai cechai, kuriuose geležinės ir plieninės detalės elektrolizės būdu padengiamos plonais nerūdijančių metalų (chromo, nikelio, cinko) sluoksniais. Analogiškai sidabruojami ir auksuojami papuošalai. **Metalinių dangų nusodinimas ant gaminių vadinamas galvanostègija**. Pastaruoju metu išrasti būdai tokioms dangoms nusodinti ir ant plastmasės paviršių.

Daug šioje srityje yra padarę ir Lietuvos mokslininkai (ypač per pokario dešimtmečius). Lietuvos mokslų akademijos Cheminės technologijos institutas Vilniuje yra vienas stambiausių pasaulyje metalų dangų sudarymo elektrolizės metodais tyrimo centrų.

Tikslių metalinių kopijų gamyba elektrolizės būdu vadinama galvanoplãstika. Vaškinis arba gipsinis modelis padengiamas plonu grafito sluoksniu ir kaip katodas dedamas į elektrolito tirpalą, kuriame ant jo nusėda reikiamo storio metalo sluoksnis. Gaunama tiksli metalinė kopija. Galima metalą atskirti nuo modelio ir gautoje formoje lieti kopijas. Galvanoplastikos būdu gaminamos tipografinės klišės, patefonų plokš-

telių matricos, skulptūrų ir bareljefų kopijos. Galvanoplastinį metodą 1838 m. išrado rusų fizikas B. Jakobis (1801–1874).

Vykstant elektrolizei, patys elektrodai gali reaguoti arba nereaguoti su elektrolitu. Platinos, grafito arba anglies elektrodai yra inertiški ir su tirpalu nereaguoja, todėl ant abiejų elektrodų išsiskiria medžiaga (pvz., vykstant HCl elektrolizei, išsiskiria vandenilio ir chloro dujos). Tokiu būdu iš įvairių junginių gaunamas vandenilis, deguonis, chloras, natris, aliuminis, sintetinami įvairūs cheminiai junginiai farmacijai, parfumerijai ir t. t. Šis elektrocheminis medžiagų gavimo būdas ganėtinai paprastas, o medžiagos gaunamos labai grynos.

Kai elektrodai padaryti iš to paties metalo, kurio jonų yra elektrolite, anodas elektrolizės metu tirpsta – metalas pereina į elektrolitą, o iš jo nusėda ant katodo. Tai patogus būdas priemaišoms išvalyti iš vario, aliuminio, geležies, sidabro ir kitų metalų.

Klausimai ir užduotys

1. Ką vadiname elektrolitine disociacija? Nuo ko priklauso disociacijos laipsnis?

2. Ką vadiname rekombinacija?

3. Apibūdinkite Faradėjaus (elektrolizės) dėsnius.

4. Paaiškinkite elektrocheminio ir cheminio ekvivalento fizikinę prasmę.

5. Paaiškinkite fizikinę Faradėjaus konstantos prasmę.

6. Koncentruota sieros rūgštis laikoma geležiniuose induose, o praskiesta – stikliniuose. Kodėl?

7. Vykdant elektrolizę galvaninėse voniose, kartais pakeičiama elektros srovės kryptis. Kodėl taip daroma?

8. Nikeliuojamos plokštelės paviršius padengiamas 0,05 mm storio nikelio sluoksniu. Koks būna vidutinis elektros srovės tankis, jeigu nikeliuojama 2,5 h?

9. Vykstant sidabro nitrato tirpalo elektrolizei, per valandą išsiskyrė 9,4 g sidabro. Kokia buvo poliarizacijos evj, jeigu vonios gnybtų įtampa 4,2 V, o tirpalo varža 1,5 Ω?

10. Kiek dvivalenčio metalo atomų išsiskirs ant 1 cm^2 elektrodo paviršiaus per 5 min, kai elektros srovės tankis lygus 0,1 A/dm^2?

11. Įkraunant švino akumuliatorių, per 30 min išsiskyrė 0,30 g vandenilio. Kokia galia suvartojama įkraunamame akumuliatoriuje elektrolitui kaitinti, jeigu elektrolito varža 0,40 Ω?

12. Aliuminis gaunamas elektrolizės būdu iš aliuminio oksido, esančio išlydytame krioline, tirpalo. Elektrolizės vonia teka 30 kA stiprio elektros srovė, vonios našumo koeficientas lygus 80%. Kiek aliuminio gaunama per 1 h?

13. Plokštę nikeliavo 2,5 h, leidžiant ja 1,6 A/dm^2 tankio elektros srovę. Kokio storio nikelio sluoksnis nusėdo ant plokštės?

14. Atliekant vandens elektrolizę, buvo leidžiama 2,6 A stiprio elektros srovė ir per 1 h gauta 0,5 l deguonies, kurio slėgis $1{,}33 \cdot 10^5$ Pa. Kokia to deguonies temperatūra?

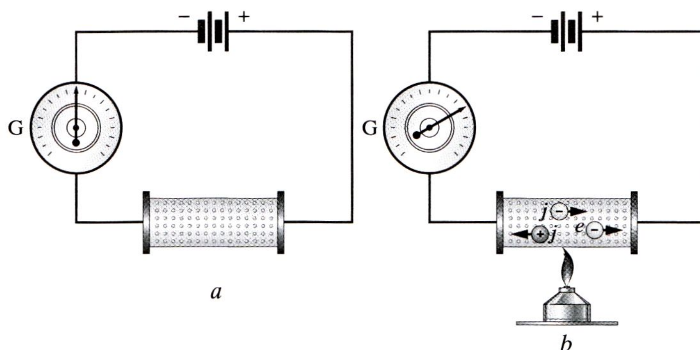
82. Elektros srovė dujose. Nesavaiminis ir savaiminis išlydis

Dujos normaliomis sąlygomis yra geri dielektrikai – jose laisvųjų krūvininkų praktiškai nėra (169 pav., *a*).

Kad dujomis tekėtų elektros srovė, jų molekules ar atomus reikia jonizuoti – atplėšti nuo jų bent po vieną elektroną. **Mažiausia energija, kurią reikia panaudoti išplėšiant elektroną iš atomo arba molekulės, vadinama rỹšio enèrgija.**

Elektronų išlaisvinimas iš medžiagos atomų vadinamas jonizãcija.

Elektronas gali būti išplėštas iš atomo susiduriant dviem atomams, kurių kinetinė energija viršija elektrono ryšio energiją. Atomų bei molekulių šiluminio judėjimo kinetinė energija tiesiogiai proporcinga absoliučiajai temperatūrai, todėl, kylant dujų temperatūrai, daugėja atomų bei molekulių susidūrimų, sukeliančių jonizaciją. Išoriniu jonizatoriumi gali būti liepsna, ultravioletiniai, rentgeno spinduliai, radioaktyvusis spinduliavimas ir kt. (169 pav., *b*). Jonizuotose dujose atsiradę elektronai prisijungia prie molekulių ar atomų. Taigi dujų judrūs krūvininkai yra laisvieji elektronai, teigiamieji ir neigiamieji jonai. Dėl priešingų ženklų krūvių, rekombinacijos (molekulių arba atomų susidarymo) judriųjų krūvininkų koncentracija mažėja. Tačiau tarp abiejų procesų – jonizacijos ir rekombinacijos – gali susidaryti dinaminė pusiausvyra, kai atsirandančių krūvių skaičius lygus išnykstančiųjų krūvių skaičiui.



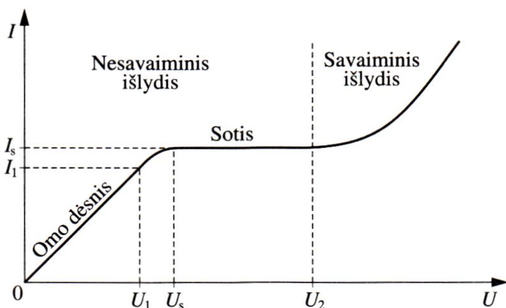
169 pav.

Išorinio elektrostatinio lauko veikiami, laisvieji krūvininkai juda link atitinkamų elektrodų ir ten vėl virsta neutraliais atomais arba molekulėmis. **Elektros srovės tekėjimas dujomis vadinamas elèktros ìšlydžiu.**

Reiškinys, kuriam esant elektros srovė dujose teka veikiant išoriniam jonizatoriui, vadinamas nesaváiminiu ìšlydžiu. Išlydis dujose, kai išorinio jonizatoriaus nėra, vadinamas saváiminiu.

Elektrinį išlydį dujose apibūdina *voltampèrinė charakterìstika*, t. y. elektros srovės stiprio priklausomybė nuo įtampos tarp elektrodų (170 pav.). Didinant įtampą, vis didesnis krūvininkų skaičius pasiekia anodą ir nespėja rekombinuoti. Iki įtampos U_1 galioja Omo dėsnis, ir srovės stipris I yra proporcingas įtampai U. Kai įtampa pasiekia ir viršija soties vertę U_s, srovės stipris tampa pastovus ir lygus I_s. Tuomet elektrodus pasiekia visi krūvininkai, kuriuos jonizatorius sukuria. Didinant jonizatoriaus galią, didėja ir soties srovės stipris. Kai įtampa viršija U_2, laisvieji elektronai įgyja tokį pagreitį,

kad patys geba jonizuoti molekules. Jonizacijos metu atsiradę elektronai įgyja pagreitį ir taip pat jonizuoja kitas molekules. Taip susidaro elektronų griūtis, ir įvyksta elektrinis dujų pramušimas. Dabar ir visai pašalinus jonizatorių, elektros srovė dujomis vis tiek tekės. Šio reiškinio priežastis – vadinamoji *smū̃ginė dùjų jonizãcija*, mat stipriame elektriniame lauke elektringosios dalelės įgyja didelį greitį ir jų kinetinės energijos pakanka, susidūrus su neutralia molekule, išmušti iš jos elektroną.



170 pav.

Smūginė jonizacija prasideda tada, kai elektronas laisvai lėkdamas įgyja kinetinės energijos, kuri viršija jo ryšio su atomu energiją W.

Kinetinė energija W_k, kurią elektronas įgyja, veikiamas elektrinio lauko (jo stipris $\vec{E}$), lygi lauko jėgų darbui: $W_k = Fl = q_eEl$; čia l – elektrono laisvojo kelio ilgis. Iš šios lygties užrašome apytikslės smūginės jonizacijos pradžios sąlygą:

$$q_eEl \geq W_k. \tag{215}$$

Atomų ir molekulių elektronų ryšio energija dažniausiai išreiškiama *elektronvòltais* (eV). *Tai darbas, kurį atlieka elektrinis laukas, perkeldamas elektroną (arba kitą dalelę, turinčią elementarųjį krūvį) iš vieno lauko taško į kitą, tarp kurių įtampa lygi 1 V* ($A = q_eU$, tai 1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$C; 1 V = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$J).

Savaiminiai išlydžiai yra įvairūs; jų pobūdis priklauso nuo dujų slėgio ir įtampos tarp elektrodų.

1. Kai elektrinio lauko stipris yra apie 3000 V/mm, oras staiga jonizuojasi ir tarp elektrodų nusidriekia akinamai švytintis laužytos formos kanalas arba gyslelių pluoštas – *kibirkštìs*. Kibirkštinį išlydį lydi būdingas traškesys. Milžiniško kibirkštinio išlydžio pavyzdys – žaibas. Jonizuotų dujų temperatūra kibirkštiniame kanale siekia kelis tūkstančius laipsnių, o slėgis – šimtus atmosferų. Dėl kontaktų kibirkščiavimo atsiranda daug keblumų: kibirkštys lydo, ardo metalą, gadina jungiklius ir relių kontaktus. Kibirkštys gali būti ir naudingos: jomis pramušamos mikroskopinio dydžio skylutės stikle, plastmasėje ir kitose izoliacinėse medžiagose. Elektros kibirkštimi galima išgręžti sudėtingo profilio angą kiečiausiame metale. Kibirkštis uždega benzino garus vidaus degimo variklyje ir kt.

2. Nevienalyčiame elektriniame lauke smūginė jonizacija gali vykti ne visur, o tik ten, kur laukas stipriausias, ir be kibirkštinio išlydžio. Tai – *vainìkinis ìšlydis*. Švytintis vainikas apie laidus susidaro dujoms jonizuojantis ne visoje (tarp laidų) erdvėje, o tik arti jų, kur laukas yra stipriausias. Dėl vainikinio išlydžio susidaro krūvio nutekėjimas nuo laidininkų smaigalių, nuo laidų aukštos įtampos tinkluose. Šitaip susidaro gana nemaži elektros energijos nuostoliai. Vainikinis išlydis naudojamas elektriniuose filtruose.

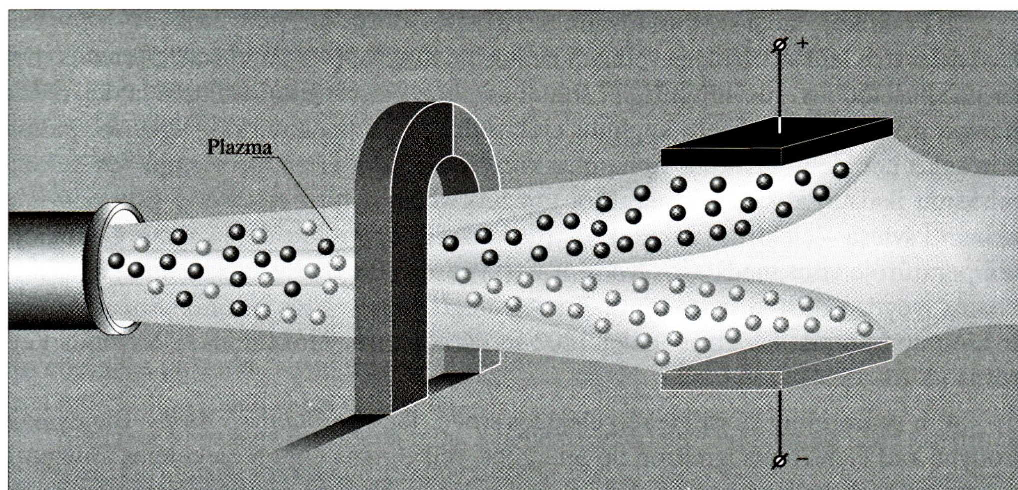
3. Praktikoje labai svarbus savaiminio išlydžio atvejis – *elèktros lañkas* (Voltos lankas). Elektros lankas užsidega veikiant neaukštai įtampai (40–50 V), tačiau srovės stipris turi būti didelis – dešimtys ir net šimtai amperų. Norint gauti elektros lanką, reikia įtampą prijungti prie dviejų anglinių elektrodų, jų galus akimirkai suglausti, paskui atitraukti nedideliu atstumu vieną nuo kito. Elektrodai kontakto vietoje vos ne akimirksniu įkaista; aukšta temperatūra jonizuoja orą, ir tarp elektrodų galų nušvinta akinanti šviesa – elektros lankas. Elektros lanko temperatūra siekia 4000 °C. Tokioje temperatūroje visos medžiagos lydosi ir virsta garais. Elektros lankas naudojamas metalams lydyti, pjaustyti ir suvirinti. Tai – galingiausias šviesos šaltinis prožektoriams ir kino aparatams. Elektros lanką 1802 m. išrado rusų mokslininkas Vasilijus Petrovas (1761–1834).

4. Ir praretintu oru gali tekėti elektros srovė. Tai – *rusẽnantysis ìšlydis*. Bandymais įrodyta, kad elektronus įgreitinti iki energijos, reikalingos dujų molekulėms jonizuoti, galima ne vien keliant įtampą. Kuo ilgiau judės elektronas greitinančiame lauke iki susidurdamas su molekule, tuo daugiau energijos jis įgis. Išsiurbiant orą (likus vamzdelyje vos tūkstantajai daliai molekulių), tūkstantį kartų pailgėja elektrono laisvasis prabėgimo kelias. Taip įsibėgėję elektronai įgauna energijos, reikalingos molekulėms jonizuoti, ir vamzdelyje prasideda smūginė jonizacija. Kiekvienos praretintos dujos švyti tik joms būdinga spalva: neonas – raudonai; helis – geltonai; vandenilis – mėlynai ir t. t. Raidžių ir ornamentų pavidalu išlankstyti įvairių spalvų dujošvyčiai vamzdeliai naudojami reklamai, dekoratyviniams scenos efektams ir kt. Specialios konstrukcijos dienos šviesos lempos naudojamos gatvėms, gamybinėms patalpoms, prekybos centrams apšviesti.

Tyrinėdami išlydį dujose, susidūrėme su ketvirtąja medžiagos būsena – *plazmà* – dalinai ar net visiškai jonizuotomis dujomis, kurių teigiamųjų ir neigiamųjų krūvių tankiai (koncentracija) yra beveik vienodi. Todėl tokios dujos yra neutralios. Visiškai jonizuotose dujose neutralių dalelių nėra. Jų elektrinis laidumas artimas superlaidininkų laidumui. Maždaug $20 \cdot 10^3$ K–$30 \cdot 10^3$ K temperatūroje kiekviena medžiaga tampa visiškai jonizuota plazma. 99,9% Visatos medžiagos yra plazmos pavidalo: Saulė, žvaigždės ir tarpžvaigždinės dujos sudarytos iš plazmos. Tik vieną dešimtąją dalį procento medžiagos Visatoje sudaro tokie kosminiai kūnai, kaip mūsų Žemė.

Tarpžvaigždinės aplinkos tankis ir jos jonizacijos laipsnis yra mažas. Todėl ji yra žemos temperatūros plazma. Jonosfera – laidus viršutinis atmosferos sluoksnis (100–300 km virš Žemės) – yra silpnai jonizuotas – tai žemos temperatūros plazma. Saulės vėjas sukelia jonosferoje įvairiaspalvį jonizuoto oro švytėjimą – šiaurės pašvaistes. Įvairiomis spalvomis plazma švyti dienos šviesos lempose ir reklaminių iškabų vamzdeliuose.

Privertus plazmą dideliu greičiu skrieti tarp galingo magneto polių, joje esantys priešingų ženklų krūvininkai nukrypsta į priešingas puses. Taip juos atskyrus, elektroduose galima kaupti arba gauti evj. Elektrodus sujungus grandine, teka elektros srovė (171 pav.), – toks yra magnetinio plazmodinaminio (MPD) generatoriaus veikimo principas.



171 pav.

MPD generatorius degančio kuro energiją tiesiogiai verčia elektros energija. Pramoniniai MPD generatoriai dar tik kuriami ir bandomi, tačiau į juos energetikai deda daug vilčių, nes tokie generatoriai kuro energiją naudoja dvigubai ekonomiškiau negu šiuolaikinės šiluminės elektrinės.

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl nevyksta rekombinacija dujose tekant soties elektros srovei?

2. Kodėl, padidėjus atmosferos slėgiui, tam pačiam oro tarpui pramušti reikia aukštesnės įtampos?

3. Kodėl poliarinės pašvaistės padažnėja ir suintensyvėja didžiausio Saulės aktyvumo periodais?

4. Kokia jėga veikia elektronus plokščiojo kondensatoriaus viduje, tarp kurio plokštelių yra 1,8 cm atstumas ir 400 V įtampa?

5. Pro vakuume esantį kondensatorių lygiagrečiai jo plokštelėms 85 000 km/s greičiu skrieja elektronai. Plokštelių ilgis 6,5 cm. Prijungus prie kondensatoriaus įtampą, elektronai nukrypsta vienos plokštelės link 1,8 mm atstumu. Apskaičiuokite juos veikiančio elektrinio lauko stiprį.

6. Kokiu mažiausiu greičiu turi skrieti elektronas, kad susidūręs galėtų jonizuoti oro molekules, kurių jonizacijos energija lygi $2{,}4 \cdot 10^{-18}$J?

7. Kodėl visos dujos normaliomis sąlygomis yra geri izoliatoriai?

83. Elektros srovė vakuume. Termoelektroninė emisija ir jos taikymas

Siurbiant dujas iš indo, galima pasiekti tokią jų koncentraciją, kad molekulės suspėja praskrieti nuo vienos indo sienelės iki kitos, nė karto nesusidūrusios. Tokia inde esančių dujų būsena vadinama *vãkuumu*.

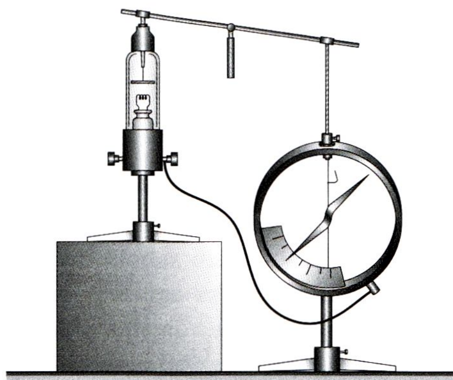
Įelektrinto elektrometro virbalą sujunkime su vienu vakuuminės stiklinės kolbos elektrodu, o korpusą – su kitu elektrodu, kuris padarytas iš plono metalinio siūlo (172 pav.). Bandymas parodys, kad elektrometras neišsielektrina.

Tarp dviejų elektrodų, esančių hermetiškame inde, iš kurio išsiurbtas oras, elektros srovė neteka, nors tarp jų ir yra įtampa. Mat vakuume nėra laisvųjų krūvininkų. 1879 m. amerikiečių mokslininkas ir išradėjas Tomas Alva Edisonas (*Edison*; 1847–1931) nustatė, kad vakuuminėje stiklinėje kolboje elektros srovė atsiranda tada, kai vienas elektrodų įkaitinamas iki aukštos temperatūros.

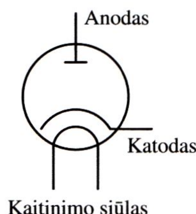
Prie metalinio siūlo išvadų prijunkime srovės šaltinį. Jeigu kaitinamas siūlas sujungtas su neigiamuoju šaltinio poliumi, tai elektrometras greitai išsielektrina. Kai siūlas sujungiamas su teigiamuoju šaltinio poliumi, elektrometras neišsielektrina, nors siūlą ir kaitina srovė. Šie bandymai įrodo, kad įkaitintas katodas spinduliuoja daleles, turinčias neigiamąjį elektros krūvį. Tos dalelės – elektronai.

Laisvųjų elektronų spinduliavimas iš įkaitintų kūnų paviršių vadinamas *termoelektrònine emìsija*.

Termoelektroninė emisija taikoma įvairiuose elektroniniuose prietaisuose. Paprasčiausias jų – *vãkuuminis diòdas*. Jį sudaro stiklinis balionas, kuriame yra du elektrodai: *katòdas* ir *anòdas*. Anodas padarytas iš metalinės plokštelės, katodas – iš plono metalinio siūlo, susukto į spiralę. Spiralės galai pritvirtinti prie metalinių strypelių, turinčių du išvadus katodui įjungti į metalinę grandinę. Katodo išvadus sujungus su elektros srovės šaltiniu, tekančia elektros srove katodo vielinę spiralę galima įkaitinti iki aukštos temperatūros. Elektros srovės kaitinama vielinė spiralė vadinama *lémpos kaĩtinimo siū́lu*. 173 paveiksle parodyta, kaip vakuuminis diodas žymimas elektros schemose.



172 pav.



173 pav.

Dėl termoelektroninės emisijos įkaitintas metalinis elektrodas nuolat spinduliuoja elektronus, kurie sudaro aplink jį elektronų debesėlį. Elektrodas įsielektrina teigiamai. Veikiami elektrinio lauko, kai kurie elektronai iš debesėlių grįžta į elektrodą. Nusistovėjus pusiausvyrai, iš elektrodo per sekundę išlekia tiek pat elektronų, kiek per tą patį laiką jų sugrįžta atgal į elektrodą. Kuo aukštesnė metalo temperatūra, tuo didesnis elektronų debesėlio tankis.

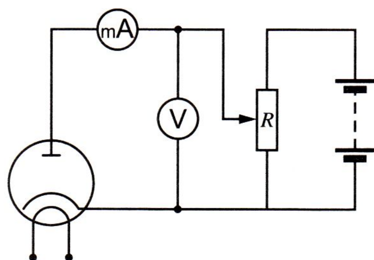
Prijungus elektrodus prie srovės šaltinio (174 pav.), tarp jų susidaro elektrinis laukas. Teigiamasis elektros srovės šaltinio polius sujungiamas su anodu, o neigiamasis – su katodu. Taip prie diodo prijungus elektros srovės šaltinį, elektrinio lauko stiprumas nukreipiamas į įkaitintą elektrodą (katodą). Šio lauko veikiami, kai kurie elektronai iš elektronų debesėlio juda anodo link. Taip sujungtoje grandinėje teka elektros srovė. Šaltinį prijungus atvirkščiai, elektrinio lauko stipris nukreipiamas iš katodo į anodą. Elektrinis laukas stumia debesėlio elektronus atgal, ir grandine elektros srovė neteka.

Vakuuminio diodo voltamperinė charakteristika, skirtingai negu metalinio laidininko, nėra tiesinė funkcija (175 pav.). Pagrindinė priežastis yra ta, kad vienas elektrodas spinduliuoja ribotą laisvųjų elektronų, sukeliančių elektros srovę diodo erdvėje, kiekį. Be to, elektronų judėjimui esminės įtakos turi elektronų debesėlio, esančio prie katodo, erdvinio krūvio laukas.

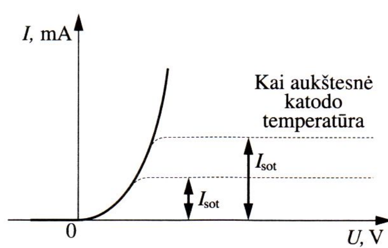
Juo aukštesnė įtampa tarp anodo ir katodo, juo mažesnis elektronų debesėlio erdvinis krūvis ir daugiau elektronų pasiekia anodą, taigi stipresnė ir diodu tekanti elektros srovė. Jeigu katodas nėra oksidinis, tai, prijungus gana didelę įtampą, visi elektronai, išlėkę iš katodo, pasiekia anodą. Toliau didinant įtampą, elektros srovės stipris nekinta, prasideda įsotinimas (brūkšninė linija, 175 pav.). Pašildžius elektrodą, jo temperatūra pakils ir iš jo išlėks daugiau elektronų. Tokiu būdu debesėlio ties katodu tankis pasidarys didesnis. Esant aukštesnei įtampai tarp katodo ir anodo, susidarys soties srovė. Elektroninėje lempoje su oksidiniu katodu pasiekti soties srovės negalima, nes tam reikėtų labai didelio potencialų skirtumo, kuriam esant katodas suirtų.

Kadangi vakuuminiu diodu elektros srovė gali tekėti tik viena kryptimi, tai jie naudojami kintamajai elektros srovei lyginti.

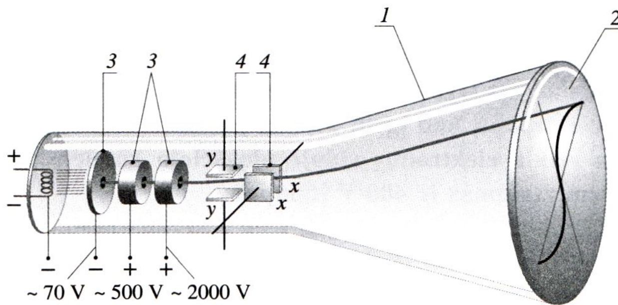
Greiti elektronai, atsimušdami į kai kurias medžiagas, sukelia jų švytėjimą. Tokios medžiagos vadinamos *švytalaĩs* (*liuminofòrais*). *Kuo daugiau atsimušančių elektronų, tuo stipresnis švytėjimas.* Taikant šią savybę, elektrinius signalus galima paversti šviesos



174 pav.



175 pav.



176 pav.

ir spalvų signalais. Keičiant elektronų pluoštą – jo stiprį ir kryptį, atitinkamai keisis bombarduojamo liuminoforo švytinčios dėmelės ryškumas ir vieta. Toks elektroninis „pirštukas“ piešia vaizdą elektroniniuose vamzdžiuose (176 pav.).

Elektroninį vamzdį sudaro storasienė kolba (*1*), iš kurios išsiurbtas oras. Priekinė kolbos sienelė – ekranas (*2*), iš viršaus padengtas švytalu, kuris švyti, veikiamas greitų elektronų. Kolboje įmontuotas elektronų prožektorius (*3*) – įtaisas, kuris sukuria elektronų srautą ir suglaudžia jį į siaurą spindulį. Elektronų spindulio kryptį (elektronų lėkimo kryptį) galima valdyti elektriniu arba magnetiniu lauku. Šis laukas sukuriamas tarp dviejų kreipimo plokščių: neigiamai įelektrinta plokštė elektronus stumia, o teigiamai įelektrinta – traukia. Vamzdyje įmontuotą spindulio valdymo sistemą (*4*) sudaro dvi horizontalios („*y*“ valdymo) ir dvi vertikalios („*x*“ valdymo) plokštės. Elektriniai signalai (pvz., atsiradę televizoriaus antenoje priimant transliuojančios stoties bangas) keičia įtampą tarp vienos ir kitos poros plokščių, ir elektronų spindulys verčiamas judėti ekranu – „piešti“ elektrinį signalą atitinkantį vaizdą.

Švytalo švytėjimas inercijos neturi, todėl užgęsta tą pačią akimirką, kai elektronai nustoja jį bombarduoti. Žmogaus sąmonė užfiksuotą vaizdą išlaiko 1/16 sekundės dalį, todėl greitai atsirandančių ir išnykstančių švytinčių taškų mozaiką žmogus suvokia kaip ištisinį švytintį vaizdą.

Elektroniniai vamzdžiai naudojami periodiniams procesams tirti, stebėti, užrašyti (oscilografų vamzdžiai), vaizdui televizorių ekranuose atkurti (kineskopai), atspindėtiems radiolokatoriaus signalams registruoti bei matuoti (radiolokatorių vamzdžiai).

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl elektronų debesėlis trukdo išlėkti iš metalo naujiems elektronams?

2. Kodėl diodas dažnai vadinamas „elektroniniu ventiliu“?

3. Kuo ypatinga vakuuminio diodo voltamperinė charakteristika?

4. Kokių sąlygų reikia, kad vakuume tekėtų elektros srovė?

5. Greitinimo įtampa elektroniniame vamzdyje lygi 1,5 kV, atstumas nuo kreipimo plokščių iki ekrano 30 cm. Atstumas tarp plokščių 0,5 cm, jų ilgis 2,5 cm. Kokiu atstumu pasislinks dėmė oscilografo ekrane, suteikus kreipimo plokštėms 20 V įtampą?

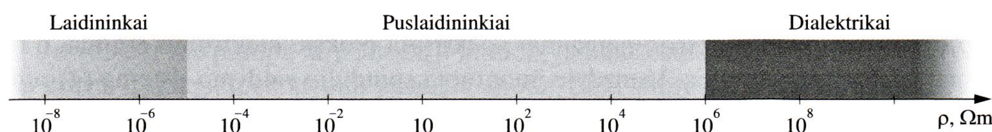
6. Kokią mažiausią kinetinę energiją turi turėti katodinių spindulių elektronai, kad jonizuotų vamzdyje esančius helio atomus, kurių jonizacijos potencialas 24,5 V? (Jonizacijos potencialas yra lygus potencialų skirtumui tarp dviejų lauko taškų, tarp kurių turi praeiti elektronas, kad įgytų atomui jonizuoti reikalingą energiją.)

7. Kokia jėga veikia elektronus viduje plokščiojo kondensatoriaus, tarp kurio plokštelių yra 1,8 cm atstumas ir 400 V įtampa?

8. Kokį darbą atlieka elektrinio lauko jėga, perkeldama oriniame plokščiajame kondensatoriuje elektroną išilgai jėgų linijos 12 μm atstumu, jeigu kondensatoriaus įtampa 520 V, o atstumas tarp jo plokštelių 1,5 cm?

84. Elektros srovė puslaidininkiuose. Savasis ir priemaišinis puslaidininkių laidumas

Pùslaidininkiai – tai medžiagos, kurių elektrinis laidumas skiriasi nuo laidininkų ir dielektrikų laidumo, o savitoji varža yra nuo 10^{-5} Ωm iki 10^{-8} Ωm (kylant temperatūrai, ji mažėja, o laidininkų – didėja (177 pav.).



177 pav.

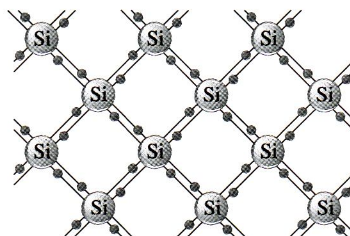
Puslaidininkių grupė yra periodinės cheminių elementų lentelės viduryje. Tai elementai: $_5$B, $_{12}$C, $_{14}$Si, $_{15}$P, $_{16}$S, $_{32}$Ge, $_{33}$As, $_{34}$Se, $_{50}$Sn, $_{51}$Sb, $_{52}$Te, $_{53}$J. Prie puslaidininkių priskiriamas ir didelis junginių skaičius, pavyzdžiui, SiC, Cu_2O, PbS, CdSe ir t. t. Puslaidininkių savitoji varža ir elektrinis laidumas labai priklauso nuo išorinių sąlygų: temperatūros, apšviestumo, elektrinio ir magnetinio laukų.

Grynųjų puslaidininkių savasis elektrinis laidumas gali būti dvejopas – *elektròninis* ir *skylìnis*.

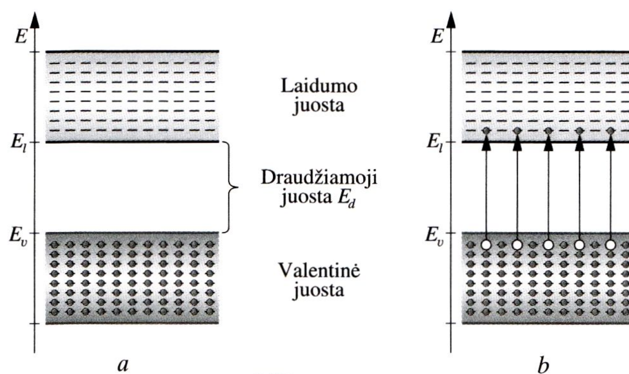
Germanio ir silicio kristaluose gretimų atomų elektronai sudaro *kovaleñtinius ryšiùs*. Juodi skrituléliai yra valentiniai elektronai, o linijos – kovalentiniai ryšiai (178 pav.).

Minėtuose grynuose kristaluose, esant 0 K temperatūrai, valentinė juosta yra pilna elektronų, o laidumo juosta – visiškai tuščia (179 pav., *a*). Toks puslaidininkis yra izoliatorius.

Kai temperatūra yra aukštesnė negu 0 K, dėl atomų šiluminio judėjimo kai kurie valentiniai elektronai, gavę tam tikrą energijos kiekį, lygų draudžiamosios juostos pločiui ($E_d = E_l - E_v$), gali peršokti iš valentinės juostos į laidumo juostą, palikdami valentinėje juostoje laisvą vietą, vadinamą *skylė* (179 pav., *b*).



178 pav.



179 pav.

Įnešus tokį puslaidininkį į elektrinį lauką, laidumo juostoje elektronai judės iš vieno energijos lygio į kitą prieš elektrinio lauko jėgų kryptį ir sudarys elektroninį, arba *n*, laidumą (elektronas, patekęs į laidumo juostą, tampa laisvas ir pagerina kristalo elektros laidumą). Valentinėje juostoje susidariusios skylės pasižymi teigiamojo krūvio pertekliumi, nes, prieš peršokant elektronams į laidumo juostą, tos vietos buvo neutralios. Vadinasi, skylės krūvis yra teigiamas ir skaitiniu didumu lygus elektrono krūviui. Veikiant elektriniam laukui, į skylę gali pereiti elektronas iš gretimo kovalentinio ryšio, o skylė – pasislinkti į jo vietą. Skylės užleidžia vietą prieš elektrinį lauką valentinėje juostoje judantiems elektronams, o pačios slenka elektrinio lauko kryptimi, tartum perneša teigiamąjį krūvį ir sudaro elektros srovę.

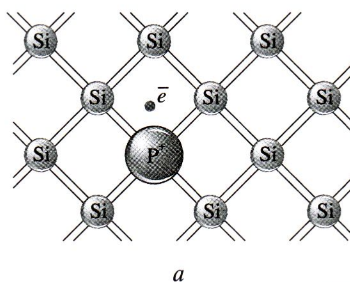
Skylučių judėjimas valentinėje juostoje yra vadinamas skyliniu, arba *p*, laidumu.

Taigi išsiaiškinome, kad elektrono šuolio iš valentinės į laidumo juostą metu susikuria krūvininkų pora – laisvasis elektronas ir laisvoji skylė. Ir vienas, ir kitas gali dalyvauti kuriant elektros srovę kituose reiškiniuose. Tokį krūvininkų atsiradimą vadiname *šiluminė generãcija*. Grynųjų puslaidininkių šiluminės generacijos sparta priklauso nuo draudžiamosios juostos pločio ir temperatūros.

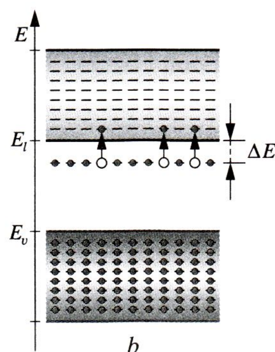
Puslaidininkiai, kuriuose krūvininkai atsiranda daugiausia dėl šiluminės generacijos (sužadinimo) elektronui peršokant iš juostos į juostą, vadinami *sãvojo laidùmo pùslaidininkiais* ($n = p$).

Dažnai puslaidininkiuose vyksta ir atvirkščias procesas – *rekombinãcija*. Šiuo atveju elektronai peršoka iš laidumo juostos į valentinėje juostoje esančią laisvą vietą – skylę. Tokiu būdu elektronas neutralizuoja teigiamąjį skylės krūvį ir dalyvauja tarpatominiame ryšyje. Rekombinacijos procesas mažina puslaidininkio laidumą.

Jeigu į silicio kristalinę gardelę įterptume penktosios grupės elementų, pavyzdžiui, fosforo (P) atomą, tai šis užimtų vieno silicio atomo vietą (tokį intarpą plokštumoje vaizduoja 180 pav., *a*) ir, būdamas penkiavalentis, ryšiams su artimiausiais kaimynais naudotų tik keturis valentinius elektronus, o penktąjį, atliekamą, galėtų skirti „bendriems reikalams“, pavyzdžiui, kristalo laidumui padidinti. Beje, jam atitrūkti nuo atomo reikės labai mažos energijos. Šios situacijos juostinis modelis pavaizduotas 180 paveiksle, *b*. Čia brūkšneliais draudžiamojoje juostoje pažymėtas fosforo atomų energijos lygmuo. Jis vadinamas *donoriniù* ($n > p$), nes laidumo juostai tiekia elektronus.



a



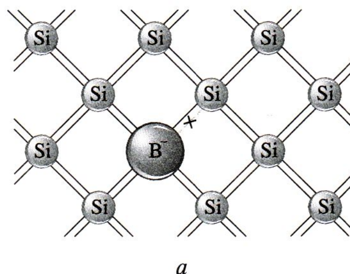
b

180 pav.

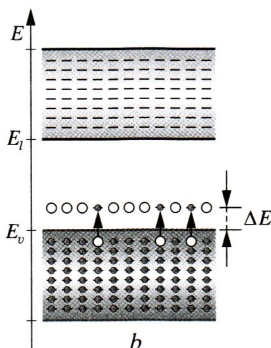
Esant kambario temperatūrai, silicio draudžiamosios juostos energija $E_d \approx 1{,}1$ eV, o donorinio lygmens atomų jonizacijos energija (atstumas energijos skalėje nuo lygmens iki laidumo juostos dugno) tėra vos kelios šimtosios elektronvolto. Konkrečiai fosforo priemaišos $\Delta E = 0{,}044$ eV. Taigi, norint išlaisvinti iš tokio priemaišinio lygmens elektroną, atomui tereikia suteikti mažytę energijos porciją. Todėl dauguma įterptų šios priemaišos atomų būna jonizuoti jau kambario temperatūroje.

Elektronas, atitrūkęs nuo priemaišos atomo, suprantama, tampa viso kristalo „nuosavybe" ir gali judėti laidumo juostos lygmenimis. O netekęs elektrono, atomas tampa teigiamuoju jonu, stipriai surištu su gardele ir negalinčiu padidinti laidumo.

Panašiai pasikeis silicio kristalas, įterpus į jį trečiosios grupės elementų, pavyzdžiui, boro (B) atomų (181 pav., *a*). Čia svetimasis atomas, būdamas trivalentis, negalės patenkinti savo artimiausių keturių kaimynų „bendravimo" poreikių – užpildyti išorinių sluoksnių, nes jam trūks vieno elektrono. Susidariusią laisvą vietą nesunkiai užims kaimynų elektronas, o jo vietoje bus mums jau žinoma skylė. Juostinis šios situacijos modelis pavaizduotas 181 paveiksle, *b*. Brūkšneliais čia parodytas priemaišos atomų lygmuo. Jis vadinamas *akceptoriniu*, nes iš valentinės juostos gali pasigauti elektronų, kurių vietoje atsiras skylės. Kitaip tariant, jis tiekia skyles valentinei juostai. Šio lygmens nuotolis nuo valentinės juostos labai nedidelis. Boro priemaišos $\Delta E = 0{,}045$ eV. Todėl panašiai, kaip ir įterpus fosforo, dauguma šios priemaišos atomų bus jonizuoti jau kambario temperatūroje. Boro atomai, „pasigrobę" po elektroną, tampa neigiamaisiais jonais, bet laidumo taip pat nepadidina.



a



b

181 pav.

Puslaidininkis, kuriame elektros srovę sudaro elektronų judėjimas, o taip būna, kai jis legiruotas donorinėmis priemaišomis, vadinamas *elektròninio laidùmo* (*n*) *pùslaidininkiu*, arba tiesiog *elektròniniu pùslaidininkiu.* Puslaidininkis, kuriame dominuoja skylės (legiruotame akceptorinėmis priemaišomis), vadinamas *skylìnio laidùmo* (*p*) *pùslaidininkiu*, arba *skyliniù pùslaidininkiu*. Žymima šitaip: *n* GaAs; *n* Ge; *n* Si; *p* Ge; *p* Si ir t. t. Čia „*n*" raidė reiškia, kad pagrindiniai krūvininkai puslaidininkyje yra neigiamieji elektronai, o „*p*" – kad teigiamosios skylės (iš angl. *negative* ir *positive*).

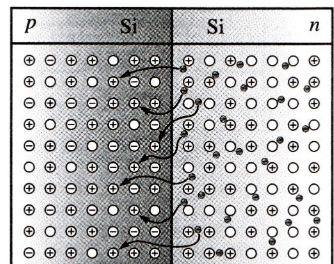
Žinoma, šalia elektronų *n* puslaidininkyje ir skylių *p* puslaidininkyje, vadinamų pagrindiniais krūvininkais, visada yra šiek tiek skylių *n* puslaidininkyje ir elektronų *p* puslaidininkyje. Tai – šalutiniai krūvininkai. Jie atsiranda dėl šiluminės generacijos elektronui peršokant iš juostos į juostą. Vadinasi, *n* puslaidininkio $n \gg p$, o *p* puslaidininkio $p \gg n$. Elektroniniai ir skyliniai puslaidininkiai paprastai vadinami *priemaišìniais pùslaidininkiais*. Tuo pabrėžiamas jų skirtumas nuo grynųjų puslaidininkių, kurių $n = p$.

85. *pn* sandūros savybės. Puslaidininkinis diodas ir jo naudojimas. Tranzistorius

Jau vien iš pavadinimo galima spėti, kad *pn sándūra* turėtų būti sritis, kur liečiasi du skirtingo laidumo, t. y. skylinio ir elektroninio, puslaidininkiai. Tokią sandūrą galima gauti suglaudus tos pačios medžiagos, tik skirtingo laidumo tipo arba skirtingų puslaidininkinių medžiagų gabalus. Tačiau taip suglausta sandūra būtų pernelyg netobula, nes dėl paviršiaus nelygumų net labai gerai nupoliruotų kristalų sandūroje visada esti įvairiausių defektų, tarp jų – atomų, oro, dujų molekulių priemaišų. Todėl tokios sandūros nenaudojamos.

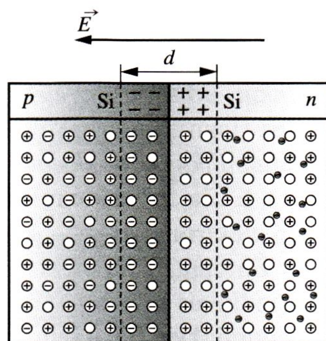
Teoriškai ir praktiškai gerai ištirtos *pn* sandūros, sudarytos viename, vienalyčiame sandūros aspektu puslaidininkio gabale. Dabartinės puslaidininkių technologijos leidžia suformuoti tokias sandūras auginant patį kristalą arba vėliau jį apdorojant.

Taigi turime *pn* sandūrą viename kristale, tarkime, silicyje. Kaip prisimename, jame nesunku sudaryti *n* ir *p* sritis įterpus į kristalą fosforo ir boro priemaišų. 182 paveiksle pavaizduota tokia kristalo plokštelė ir juostinis jos modelis. Tai labai griežta dar „nesusitvarkiusi" *pn* sandūra (nenusistovėjusi pusiausvyra): krūvininkai dar nekeliauja tarp *p* ir *n* sričių, o temperatūra pakankamai aukšta, kad priemaišiniai atomai *p* ir *n* srityse būtų jonizuoti. Idealus vaizdas galėtų būti nebent pirmąją akimirką suglaudus kristalo dalis. Jis iššyk pradės keistis. Pirmiausia prasidės elektronų difuzija iš *n* srities į *p* sritį ir skylių difuzija iš *p* srities į *n* sritį, nes šių krūvininkų koncentracijos *p* ir *n* srityse labai skiriasi: $n_n \gg n_p$ ir $p_p \gg p_n$. Indeksas *n* arba *p* prie koncentracijų žymenų rodo, kurioje srityje yra ta koncentracija.



182 pav.

Atsidūrę „svetimoje šalyje" (*p* srityje), elektronai tuoj rekombinuoja su „nuolatiniais šios šalies gyventojais" – skylėmis, o skylės, patekusios iš *p* srities į *n* sritį, – su elektronais. Abipus buvusios idealios sandūros ribos



183 pav.

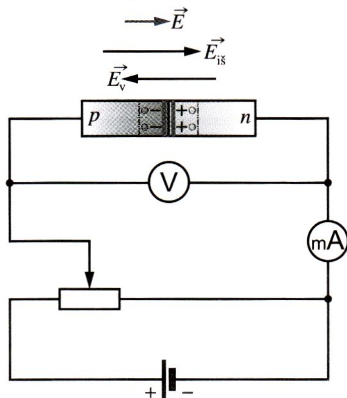
atsiranda erdvinis krūvis: netekę savo elektronų, nejudrūs fosforo atomai (teisingiau – jau jonai) sudaro teigiamąjį krūvį n Si pusėje, o boro jonai – neigiamąjį krūvį p Si pusėje. Visa tai vyksta savaime, kol susidaro užtveriamasis sluoksnis ir krūvininkai nustoja judėję. Sandūros vietoje susikuria vidinis elektrinis puslaidininkio laukas (183 pav.). Užtveriamojo sluoksnio storis d priklauso nuo skylių ir elektronų koncentracijos p ir n srityse. Susidaręs užtveriamojo sluoksnio potencialų skirtumas iškreipia energijos juostas. Sakoma, kad pn sandūroje susidaro energijos barjeras eU_k. Norint, nusistovėjus pusiausvyrai, dar daugiau elektronų perkelti iš n srities laidumo juostos į p sritį, reikia kiekvienam suteikti energijos kiekį eU_k, t. y. tiek energijos, kad galėtų įveikti barjerą (sumažinti užtveriamąjį sluoksnį). Tą patį galima pasakyti ir apie skyles. Jos irgi turi įveikti tą patį barjerą, kadangi laidumo ir valentinės juostos turi būti vienodai išlinkusios.

Išnagrinėkime, kaip veikia pn sandūrą išorinis elektrinis laukas. Elektros lauką sudarykime taip, kad jo linijos būtų statmenos sandūros plokštumai, o kryptį galėtume kaitalioti keisdami prijungto išorinio srovės šaltinio poliškumą.

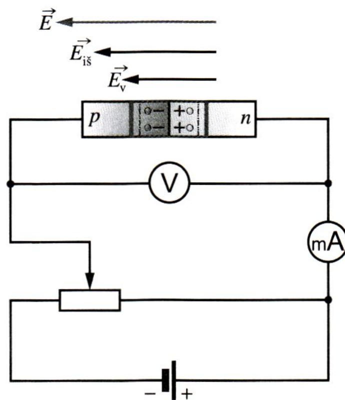
pn tipo puslaidininkį prijunkime prie nuolatinės elektros srovės šaltinio taip, kad p tipo puslaidininkiui būtų suteiktas „+“ potencialas, o n tipo – „–“ potencialas (184 pav.). Tuomet išorinio elektrinio lauko $(\vec{E}_{iš})$, sukurto pn sandūroje, kryptis bus priešinga vidinio elektrinio lauko $(\vec{E}_v)$ kryptčiai.

Taikome laukų superpozicijos principą: $\vec{E} = \vec{E}_{iš} + \vec{E}_v$; $E = E_{iš} - E_v$. Iš šios lygties matyti, kad atstojamasis elektrinio lauko stipris $\vec{E}$ sumažėjo ir yra nukreiptas $\vec{E}_{iš}$ kryptimi. Taip pat sumažėjo sandūra (184 pav.) ir energijos barjeras. Dėl to juostos bus mažiau išlinkusios, iš n srities į p sritį pradės skverbtis elektronų srautas. Analogiškai iš p srities į n sritį skverbsis skylės.

Vadinasi, sandūros varžai sumažėjus, jos laidumas padidėjo ir per ją, o kartu ir visa grandine tekės elektros srovė. Jos stipris priklausys nuo šaltinio įtampos – eksponentiškai didės jai didėjant.



184 pav.



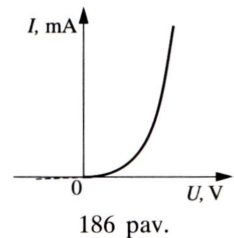
185 pav.

Reiškinys, kai elektronai įsibrauna į skylinio laidumo sritį, o skylės – į elektrinio laidumo sritį, vadinamas *krū̃vininkų injèkcija*. Šis reiškinys yra labai svarbus ir plačiai taikomas puslaidininkių elektronikoje.

Sukeitus srovės šaltinio polius vietomis, *pn* sandūroje išorinio elektrinio lauko kryptis sutaps su vidinio elektrinio lauko kryptimi (185 pav.). Taikant laukų superpozicijos principą, gaunama: $\vec{E} = \vec{E}_{\text{iš}} + \vec{E}_{\text{v}}$; $E = E_{\text{iš}} + E_{\text{v}}$. Sandūros vietoje elektrinio lauko stipris padidėjo, dėl to užtveriamojo sluoksnio storis prasiplečia. Krūvininkai neįveikia tokio didelio energijos barjero ir elektros srovė nebeteka. Sandūros vietoje padidėjo varža, o laidumas sumažėjo, – tai atbulinė sandūra.

pn sandūrų savybėmis pagrįstas daugelio prietaisų ir įrenginių veikimo principas. Tokie prietaisai yra *diòdai, tranzìstoriai, tirìstoriai*, kai kurie *laũko tranzìstoriai, fotodiòdai, šviesõs diòdai, puslaidininkiniai lãzeriai* ir t. t.

Diodai – tai patys paprasčiausi puslaidininkiniai prietaisai. Su diodo sandara ir veikimu jau susipažinome nagrinėdami *pn* sandūrą. Puslaidininkinio diodo voltamperinė charakteristika pavaizduota 186 paveiksle.



186 pav.

Diodai gaminami iš silicio, germanio, galio arsenido, silicio karbido ir kt. Sukurta įvairios paskirties ir galimybių diodų, iš kurių svarbiausi yra šie: lygintuviniai diodai, superaukšto dažnio (SAD) diodai, impulsiniai diodai, stabilitronai, griūtiniai lėkio diodai, tuneliniai diodai, varikapai ir kt.

Lygintuviniai diodai skirti žemo dažnio kintamajai elektros srovei versti nuolatine. Tai plačiai elektrotechnikoje bei radioelektronikoje naudojamos 50 Hz dažnio kintamosios srovės lygintuvai bei specialiosios paskirties aukštesnio dažnio kintamosios srovės keitikliai. Lygintuviniai diodai gaminami įvairiausių konstrukcijų. Vieni jų skirti silpnoms srovėms, kiti – didelių įtampų stiprioms srovėms, kitaip tariant, didelės galios elektros srovėms lyginti.

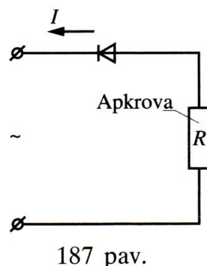
SAD diodai – tai daugiausia mažo *pn* sandūros ploto plokštieji diodai, naudojami mikrobangų (decimetrinių, centimetrinių ir milimetrinių) radioelektronikoje superaukšto dažnio virpesiams detektuoti, dažniui dauginti, keisti, kintamosios srovės amplitudei moduliuoti ir kt.

Impulsiniai diodai naudojami schemose, kuriose reikalingi labai greitos reakcijos prietaisai – pasikeitus srovės poliškumui, labai sparčiai nusistovi didelio ar mažo laidumo būsena.

Stabilitronas – tai įtampos stabilizatorius, kuris įtaisomas daugelyje elektros įrenginių pastovios įtampos didumui palaikyti.

Varikapai – tai kintamosios talpos kondensatoriai. Juose pritaikyta *pn* struktūros savybė keisti talpą kintant atgalinei įtampai. Kuo didesnė atgalinė įtampa, tuo storesnis užtveriamasis sluoksnis ir tuo mažesnė talpa. Varikapo talpos kitimą galima palyginti su plokščiojo kondensatoriaus talpos kitimu, kai didinamas atstumas tarp jo elektrodų. Varikapų veikimo sparta labai didelė, jie yra mažų matmenų ir labai patikimi. Varikapai naudojami televizijos kanalų perjungikliuose, parametriniuose stiprintuvuose ir įvairiuose kituose radiotechnikos įtaisuose, taip pat ir integrinėse schemose. Sta-

bistoriai yra puslaidininkiniai diodai, skirti įtampai stabilizuoti. Nuo minėtų stabilitronų jie skiriasi tuo, kad stabilizuoja mažesnes įtampas, tesudarančias dešimtąsias volto dalis. Juose naudojama diodų savybė – labai staigiai sustiprinti srovę nedidelių tiesioginių įtampų srityje.



187 pav.

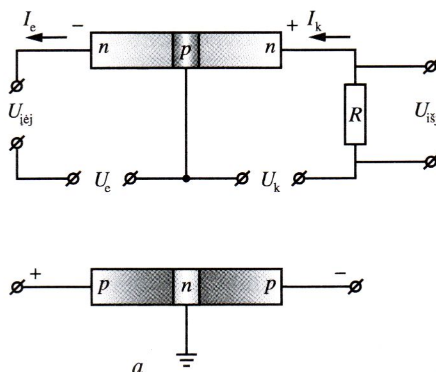
Elektrinėse schemose diodas žymimas taip, kaip parodyta 187 paveiksle. Diodo sutartinio ženklo rodyklės kryptis sutampa su tiesioginės elektros srovės kryptimi.

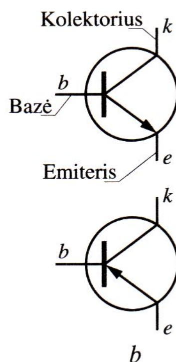
Puslaidininkiniai diodai ekonomiškesni negu lempiniai (nėra kaitinimo), maži, patikimi, tačiau jų veikimo temperatūros intervalas yra ribotas (nuo –70 °C iki 125 °C).

Dviejų *np* sandūrų kombinacija taikoma įtampos ir elektros srovės pokyčių stiprintuve – puslaidininkiniame triode arba tranzistoriuje (188 pav.).

Jame kairioji sandūra praleidžia srovę tiesiogine kryptimi, o dešinioji – atgaline. Bazės sritis labai siaura (vos keleto mikrometrų ir dar mažesnė) ir sudaryta iš priešingo laidumo puslaidininkio. Tranzistoriai, kurių vidurinis puslaidininkis yra elektroninio laidumo, vadinami *pnp* tranzistoriais, o tie, kurių vidurinis puslaidininkis yra skylinio laidumo, – *npn* tranzistoriais. Vidurinė tranzistoriaus dalis vadinama *bazè* (*b*). Stiprinamoji kintama įtampa, vadinama *įėjìmo signalù* ($U_{įėj}$), patenka tarp bazės ir vienos kraštinės dalies, vadinamos *emìteriu* (*e*). Kita kraštinė dalis vadinama *kolèktoriumi* (*k*). Jo grandinėje susidaro sustiprintas išėjimo signalas ($U_{išėj}$). Kiekviena dalis turi savo kontaktinį išvadą. Tranzistoriui reikia dviejų elektros šaltinių: mažesnės įtampos emiterio šaltinio (U_e) ir didesnės įtampos kolektoriaus šaltinio (U_k). 188 paveiksle, *a*, parodyta tranzistoriaus *npn* jungimo schema, o 188 paveiksle, *b*, – sutartinis tranzistoriaus žymėjimas. Tranzistoriaus emiterio šaltinis visuomet jungiamas taip, kad emiterio ir bazės sandūra *np* būtų laidi srovei: teigiamasis polius jungiamas su baze, o neigiamasis – su emiteriu (jeigu tranzistorius *npn*). Kolektoriaus šaltinis, atvirkščiai, turi būti prijungtas taip, kad bazės ir kolektoriaus sandūra (*pn*) būtų nelaidi elektros srovei: teigiamasis polius jungiamas su kolektoriumi, o neigiamasis – su baze.

Prijungus stiprinamąjį signalą $U_{įėj}$, jo įtampa veikia emiterio srovę I_e. Tuomet emiteriu ir baze teka ne nuolatinė, o pulsuojanti signalo dažniu srovė. Kadangi tranzistoriaus bazė labai plona, vos keleto mikrometrų ir dar mažesnio storio, tai dauguma emiterio





188 pav.

srovės elektronų nespėja rekombinuoti su bazės skylėmis, difunduoja į *pn* sandūrą ir didina jos laidumą. Sumažėjus *pn* sandūros varžai, kolektoriaus šaltinio įtampa U_k kitaip pasiskirsto tarp šios sandūros varžos ir rezistoriaus *R* varžos – didesnė jos dalis tenka rezistoriui *R*. Taigi rezistoriaus *R* įtampa kinta taip pat, kaip įėjimo signalo įtampa $U_{įėj}$, tik ji yra didesnė. Ši įtampa ir yra sustiprintas signalas $U_{išėj}$.

Naudojant tranzistorius, silpnais elektriniais signalais valdomos galingos elektros grandinės. Tranzistoriai stiprina silpnus antenų sugautus radijo ir televizijos signalus, mikrofonais bei adapteriais tekančios srovės virpesius. Pasitelkus tranzistorius, milžiniškais nuotoliais valdomi kosminiai aparatai, kuriami mikrogabaričiai skaičiavimo technikos prietaisai. Vien tik elektroniniame rankiniame laikrodyje yra apie 100 000 tranzistorių.

Už tranzistoriaus išradimą JAV fizikai Džonas Bardynas (*Bardeen*), Volteris Bratenas (*Brattain*) ir Viljamas Šoklis (*Shockley*) 1956 m. apdovanoti Nobelio premija.

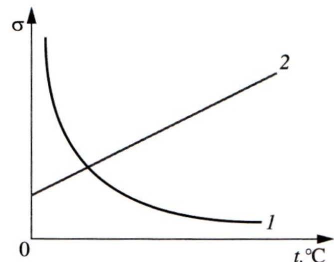
Šių dienų pramonė daugiausia gamina ne pavienius puslaidininkinius elementus (diodus, tranzistorius), o sudėtingas schemas, sudarytas iš daugybės įvairios paskirties elementų, kurie kartu „išauginami“ vienoje puslaidininkio plokštelėje. Tai – vadinamosios mikroschemos, arba lustai. Vieno tranzistoriaus matmenys jose esti vos mikroeilės dydžio. Pačiose didžiausiose, kvadratinio centimetro ploto, mikroschemose elementų jau gali būti dešimtys tūkstančių.

86. Termistoriai ir fotorezistoriai

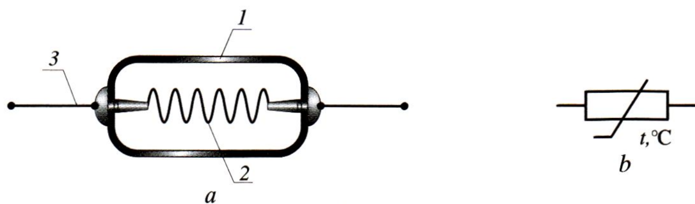
Labai svarbi puslaidininkių savybė yra ta, kad, kylant temperatūrai, staigiai mažėja jų elektrinė varža arba staigiai didėja savasis laidumas.

Juostų teorijos požiūriu šis reiškinys aiškinamas taip. Grynasis puslaidininkis 0 K temperatūroje yra izoliatorius. Kadangi puslaidininkio uždraustų energijų juosta yra siaura, tai, temperatūrai didėjant, kai kurie valentiniai elektronai įgauna pakankamai energijos peršokti iš valentinės juostos į laidumo juostą. Kuo aukštesnė temperatūra, tuo daugiau valentinių elektronų peršoka į laidumo juostą ir puslaidininkio savasis laidumas didėja. Metalų elektrinis laidumas, kylant temperatūrai, mažėja pagal tiesinį dėsnį, o puslaidininkių laidumas didėja pagal eksponentinį dėsnį. Puslaidininkiams būdingas neigiamas temperatūrinis varžos koeficientas (189 pav., kreivė 1). Jo absoliučioji vertė yra 10–20 kartų didesnė negu metalų (189 pav., tiesė 2). Pakitus temperatūrai vienu laipsniu, metalo varža padidėja maždaug 0,4%, o puslaidininkio varža sumažėja 6 – 8%.

Elektrinio laidumo priklausomybė nuo temperatūros puslaidininkyje taikoma šiluminėse varžose arba termistoriuose, kurie naudojami temperatūrai matuoti. Termistorių sudaro nedidelis (apie 0,5 mm skersmens) puslaidininkinis rutuliukas (arba plokštelė) su pritvirtintais prie jo metaliniais kontaktais (190 pav., *a*): *1* – korpusas; *2* – puslaidininkinis elementas; *3* – kontaktiniai laidai, kurie jungiami prie elektros srovės šaltinio ir mikroam-



189 pav.



190 pav.

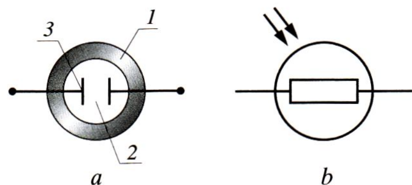
permetro, sugraduoto temperatūros laipsniais. Keičiantis temperatūrai, keičiasi ir termistoriaus varža, o kartu ir srovės stipris grandinėje.

Paprastos konstrukcijos, mažų matmenų, patikimi ir labai jautrūs temperatūrai termistoriai yra įvairių automatikos įtaisų svarbiausias elementas. Tokie įtaisai automatiškai signalizuoja apie variklių perkaitimą, pernelyg įkaitusį orą, prasidedantį gaisrą ir kt. Temperatūrai neleistinai pakilus, puslaidininkio varža sumažėja ir grandine ima tekėti srovė, kuri išjungia variklį, įjungia sireną, ventiliaciją, gaisro gesinimo įtaisus. Jautrūs šiuolaikiniai termistoriai matuoja temperatūros skirtumus milijonosios laipsnio dalies tikslumu. Parabolinis reflektorius su termistoriumi židinyje gali užregistruoti net tolimą menką šiluminį objektą, pavyzdžiui, skrendantį paukštį ar bėgantį žvėrelį. Tokie šiluminiai radarai gali būti naudojami raketai automatiškai vesti į šilumą spinduliuojantį taikinį.

Sutartinis termistorių žymėjimas schemose parodytas 190 paveiksle, *b*.

Puslaidininkio pagrindiniai krūvininkai gali išsilaisvinti, gavę energijos iš šviesos ir kitokių spindulių. Todėl kai kurių puslaidininkių, pavyzdžiui, seleno ir jo junginių, elektrinė varža kinta priklausomai nuo apšvietos. Prietaisai, kurių veikimas pagrįstas šia puslaidininkių savybe, vadinami *fotorezìstoriais*. Fotorezistorių sudaro skaidri dielektriko plokštelė (*1*), iš vienos pusės padengta plonu puslaidininkio sluoksniu (*2*). Šis sluoksnis skiria srovei laidžius elektrodus (*3*) (191 pav., *a*).

Apšvietus puslaidininkį, jame padaugėja krūvininkų, ir grandine ima tekėti srovė. Parenkant atitinkamus puslaidininkius, gaminami fotorezistoriai, jautrūs tik kuriai nors spalvai. Tuo jie yra tobulesni už termorezistorius, kurie neskiria šiluminių objektų. Fotorezistoriai plačiai taikomi įvairiausiose mokslo ir technikos srityse, ypač automatikoje ir skaičiavimo technikoje.



191 pav.

Sutartinis fotorezistorių žymėjimas schemose parodytas 191 paveiksle, *b*.

Didelę praktinę reikšmę turi vadinamieji fotogalvaniniai elementai arba saulės baterijos, kurios tiesiogiai paverčia elektromagnetinio spinduliavimo energiją elektros energija. Apšvietus metalo ir puslaidininkio arba dviejų skirtingo laidumo puslaidininkių lietimosi ribą, atsiranda elektrovara. Sujungus išorinę grandinę, galvanometras rodys srovę, kurios stipris priklausys nuo apšvietimo. Tokios saulės baterijos įtaisomos DŽP aparatūrai maitinti bei fotometriniams matavimams (*liuksmètrai, eksponomètrai*) ir šviesos srautui registruoti.

Šviesos diodai plačiai naudojami skaitmeniniuose matavimo prietaisuose, skaičiuotuvuose ir rankiniuose laikrodžiuose. Jie elektros energiją paverčia regimosios šviesos energija, kuri išspinduliuojama elektronams rekombinuojant su skylėmis *np* sandūroje.

Klausimai ir užduotys

1. Kodėl puslaidininkiniai prietaisai pirmiausia imti taikyti lėktuvų, raketų ir kosminių laivų aparatūroje?

2. Portatyvinis radijo imtuvas buityje vadinamas „tranzistoriumi“. Kokia daroma klaida taip jį vadinant?

3. Kuo vientisa mikroschema pranašesnė už schemą, surinktą iš atskirų elementų?

4. Kodėl tranzistoriaus bazės plotis turi būti mažas?

5. Kodėl priemaišų koncentracija tranzistoriaus emiteryje yra daug didesnė negu bazėje?

6. Kokia energija vartojama tranzistoriui stiprinant signalą?

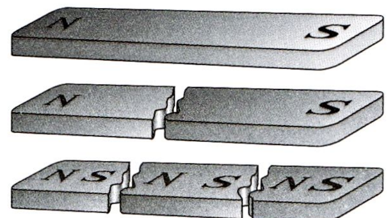
7. Nubraižykite tranzistoriaus *pnp* jungimo schemą.

8. Parašykite referatą tema „Puslaidininkių tyrimai Lietuvoje“.

13 SKYRIUS. ELEKTROMAGNETIZMAS

Magneto pavadinimas kilo iš mineralo magnetito (Fe_3O_4), kuris buvo randamas Mažojoje Azijoje, vardo. Senovės žmones jis stebino savo gebėjimu traukti geležį. Buvo žinoma, kad šią savybę įgauna geležies gabalėlis, keletą kartų išilgai pabrauktas magnetitu. Regis, kinai pirmieji aptiko, kad iš magnetito pagamintas strypelis (pailgas magnetas) pasisuka šiaurės–pietų kryptimi, jei jis gali laisvai sukiotis, pakabintas ant siūlo ar padėtas ant plūdės vandenyje. Būtent toks plūduriuojantis magnetas buvo naudojamas kaip kompasas orientuotis kelionių metu. XII a. pabaigoje jis atkeliavo ir į Europą. Tik XIV a. kompasas įgavo mums įprastą – magnetinės rodyklės, besisukiojančios ant adatėlės dėžutėje su nurodytomis pasaulio šalių kryptimis – pavidalą.

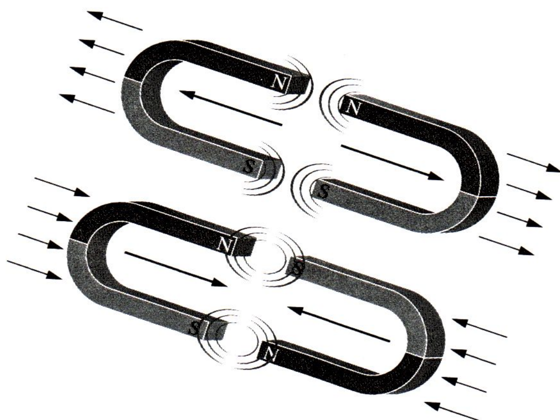
Viljamas Gilbertas (*Gilbert*), XVI a. pabaigoje pradėjęs sėkmingai tirti magnetizmo ir elektros reiškinius, pagamino apvalų magnetą ir parodė, kad jis veikia kompasą panašiai kaip Žemė, t. y. pasiūlė hipotezę, jog Žemė (tiksliau – jos branduolys) yra didžiulis magnetas.



192 pav.

Vienas iš aprašytų šios srities bandymų – magneto perpjovimas pusiau. Kadangi magnetas turi du polius – šiaurinį ir pietinį (pagal jų orientaciją į šiaurę arba į pietus), tai, atrodė, kad perpjovus magnetą, tuos polius galima atskirti. Bandymu nustatyta, kad

iš tikrųjų kiekvienas iš gabalų turi abu polius ir yra tik mažesnis magnetas (192 pav.). Raide S žymimas magneto pietinis polius (angl. *south* – pietūs), o raide N – šiaurinis polius (angl. *north* – šiaurė). Vienodi dviejų magnetų poliai (kaip ir vienodi elektros krūviai) stumia vienas kitą, o skirtingi poliai – traukia vienas kitą (193 pav.).



193 pav.

Uždarius Vilniaus universitetą, vienas žymiausių to meto Lietuvos fizikų buvo Steponas Stubelevičius, porą metų stažavęsis ir tobulinęsis Vakarų Europos aukštosiose mokyklose. 1804 m. jis grįžo į Vilnių ir čia pradėjo dėstyti naująją fiziką, paremtą eksperimentais bei matematiniais įrodymais, taip pat ėmėsi originalių elektros ir magnetizmo tyrinėjimų.

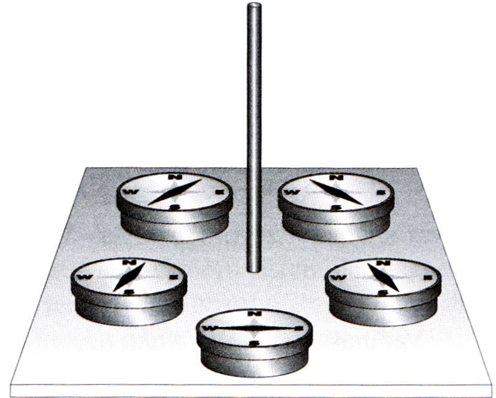
Iš pat pradžių jį lydėjo sėkmė. Pasak jo rankraščių, dar 1804 m. Stubelevičius pastebėjo, kad tarp magneto polių judinant geležinį strypelį, sujungtą laidais su elektros srovės matavimo prietaisu, šis parodė atsiradusią elektros srovę. Į ją reaguodavo ir prie laidų padėtas kompasas. Taigi Stubelevičius, matyt, daugiau kaip 20 metų prieš Faradėjų stebėjo elektromagnetinę indukciją ir anksčiau už Erstedą aptiko ryšį tarp elektrinių ir magnetinių reiškinių. Deja, Stubelevičius neįvertino savo atradimų reikšmės, nepadarė bendresnių išvadų ir neatkreipė mokslininkų dėmesio į tuos rezultatus. Beje, mokslo istorikai žino dar keletą Erstedo ir Faradėjaus pirmtakų, kurie dėl tų pačių priežasčių kaip ir Stubelevičius liko nežinomi ir nepripažinti. Mokslo atradimais dažniausiai pripažįstami tik tie atradimai, kurie turi įtakos mokslo raidai.

Magnetiniai reiškiniai, nuo seniausių laikų kėlę žmonių nuostabą ir susidomėjimą, yra neatskiriamai susiję su elektros krūvininkų judėjimu – elektros srove. Todėl šių dienų fizika nagrinėja įvairius elektromagnetinius reiškinius. Jie vaidina milžinišką vaidmenį visame mus supančiame pasaulyje pradedant atomais ir baigiant kosminiais objektais. Elektromagnetinių reiškinių pagrindu veikia visa šių dienų energetika, ryšių ir kita technika – elektros generatoriai ir varikliai, radijas ir televizija, telefonai ir magnetofonai. Šie reiškiniai taikomi transporte, skaičiavimo technikoje, automatikoje ir daug kur kitur. Jei išnyktų elektromagnetizmas, apmirtų ir visa civilizacija.

87. Srovių sąveika. Magnetinis laukas

1820 m. vasario 15 dieną danų fizikas Hansas Erstedas (*Oersted*; 1777–1851) skaitė paskaitą Kopenhagos universiteto studentams, kurioje demonstravo šiluminį srovės veikimą. Vienas smalsus studentas pastebėjo, kad, profesoriui įjungus srovę, pasisuko šalia stovėjusio kompaso rodyklė. Mokslo istorikai teigia, kad Erstedas dar prieš šį bandymą įtaręs ryšį tarp elektros ir magnetizmo bei atkakliai jo ieškojęs.

Kompaso rodyklės ar metalo drožlės išsidėsto aplink laidininką, kuriuo teka srovė, koncentriškais apskritimais (194 pav.), taigi srovė veikia magnetinę rodyklę kryptimi, statmena srovės krypčiai. Čia fizikai pirmą kartą susidūrė su tokio tipo veikiančia jėga. Kadangi rodyklė rodo magnetinio lauko kryptį, tai srovės magnetinis laukas irgi yra statmenas srovei.



194 pav.

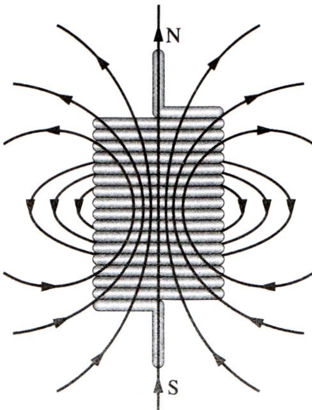
Pasklidus žiniai apie Erstedo atradimą, D. Arago ir A. Amperas po kelių mėnesių nustatė, kad, laidą susukus į ritę ir ja leidžiant srovę, ritė sukuria panašų magnetinį lauką, kaip tiesus magnetas (195 pav.), ir taip pat traukia geležį. Vėliau buvo įrodyta, kad, į ritę įkišus geležinį strypelį – šerdį, ritės magnetinis laukas sustiprėja, o toks įrenginys buvo pavadintas *elektromagnetù*.

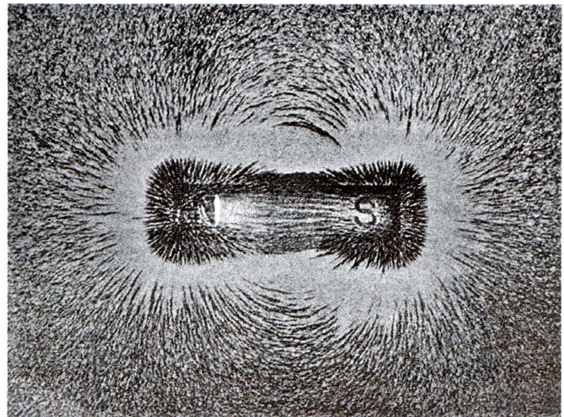
Magnetinį lauką sukuria judantys elektros krūvininkai ir kintantis elektrinis laukas. Kadangi elektros srovė yra kryptingas elektros krūvininkų judėjimas, tai ji irgi sukuria magnetinį lauką. Šis magnetinis laukas veikia kitus judančius krūvininkus ar elektros sroves. Tuo paaiškinama lygiagrečių elektros srovių sąveika: vienodų krypčių elektros srovės traukia viena kitą, o priešingų krypčių – stumia (196 pav.).

Jei turime du vienodo ilgio lygiagrečius laidininkus ir pirmuoju teka I_1 stiprio srovė, o antruoju I_2 stiprio srovė, tai jų sąveikos jėgos dydis tiesiog proporcingas srovių stiprių sandaugai, laidų ilgiui l ir atvirkščiai proporcingas atstumui r tarp jų:

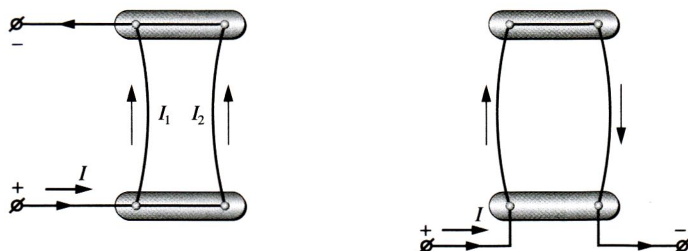
$$F = \frac{\mu\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{r}l, \quad \text{arba} \quad F = 2\cdot 10^{-7}\mu\frac{I_1 I_2}{r}l; \qquad (216)$$

čia μ – aplinkos santykinė magnetinė skvarba; μ_0 – magnetinė konstanta ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A^2 = 1,25 $\cdot$ 10^{-6} N/A^2); I_1 ir I_2 – tekančių srovių stipriai; l – laido ilgis; r – atstumas tarp laidų.





195 pav.



196 pav.

Vadinasi, *vienu laidininku tekanti elektros srovė sukuria apie save magnetinį lauką, kuris veikia kitu laidininku tekančią srovę. O šios srovės sukurtas magnetinis laukas veikia pirmuoju laidininku tekančią srovę.*

Srovių sąveikos jėgos vadinamos elektrodinãminėmis jėgomìs.

Remiantis 216 lygtimi, nusakomas elektros srovės stiprio matavimo vieneto – *ampèro* – apibrėžimas. **Amperas – tai stipris tokios srovės, kuriai tekant dviem lygiagrečiais laidininkais, esančiais vakuume 1 m atstumu vienas nuo kito, kiekvieną laido ilgio metrą veikia $2 \cdot 10^{-7}$N jėga.**

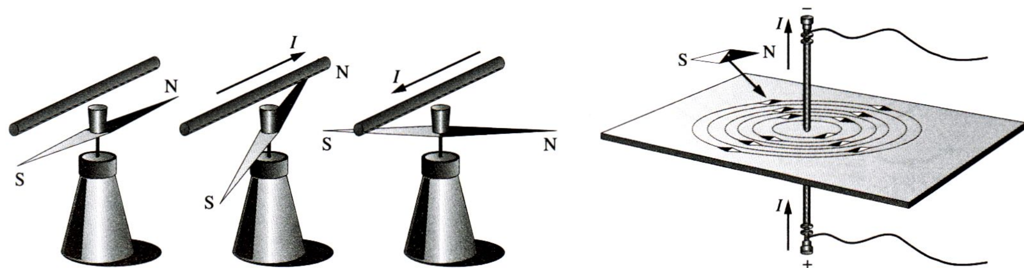
Magnètinis laũkas – ypatinga materijos forma, sudaranti sąlygas sąveikauti judančioms elektringosioms dalelėms.

Bandymais nustatytos tokios pagrindinės magnetinio lauko savybės: 1) *magnetinį lauką sukuria elektros srovė (judantys krūvininkai);* 2) *magnetinis laukas aptinkamas pagal jo poveikį elektros srovei (judantiems krūvininkams).*

Magnetinis laukas, panašiai kaip elektrinis, egzistuoja realiai, nepriklausomai nuo mūsų norų ir žinių apie jį. Šių laukų realumą galima įrodyti eksperimentiniu būdu – įrodant elektromagnetinių bangų egzistavimo realumą.

Magnetinį lauką vaizduojame magnètinio laũko jėgų̃ lìnijomis. Tai tokios linijos, kurių liestinės kiekviename taške sutampa su pasisukusios magnetinės rodyklės aši-mi. Linijos kryptimi (magnetinio lauko kryptimi) susitarta laikyti kryptį, kurią rodo magnetinės rodyklės šiaurės polius (197 pav.).

Magnetinio lauko jėgų linijos visada yra uždaros kreivės, juosiančios laidininką, kuriuo teka srovė. Laukas, kurio linijos yra uždaros, vadinamas sūkuriniù laukù. Vadinasi, magnetinis laukas, skirtingai nuo elektrinio, yra sūkurinis.



197 pav.

Pagrindinė magnetinio lauko charakteristika – magnetinė indukcija $\vec{B}$. Jos modulio skaitinė vertė lygi maksimaliai vertei jėgų momento (M_{max}), veikiančio elektros srovės rėmelius vienalyčiame magnetiniame lauke:

$$B = \frac{M_{max}}{IS}; \qquad (217)$$

čia M_{max} – maksimalus jėgų (sukimo) momentas, I – elektros srovės, tekančios rėmeliu, stipris, S – rėmelio plotas. Tarptautinėje SI matavimo vienetų sistemoje magnetinės indukcijos matavimo vienetas pavadintas *teslà* – serbų fizikui Nikolui Teslai (*Tesla*; 1856–1943) atminti: $[B] = \frac{1\,\mathrm{N} \cdot 1\,\mathrm{m}}{1\,\mathrm{A} \cdot 1\,\mathrm{m}^2} = \frac{1\,\mathrm{N}}{1\,\mathrm{A} \cdot 1\,\mathrm{m}^2} = 1\mathrm{T}$.

Magnetinės indukcijos vienetu teslà laikoma indukcija tokio magnetinio lauko, kuriame 1 m² ploto rėmelį, tekant juo 1 A stiprio srovei, veikia 1 Nm sukimo momentas. Tai eksperimentinis magnetinės indukcijos apibrėžimo supratimas, kuris gali būti užrašomas ir taip:

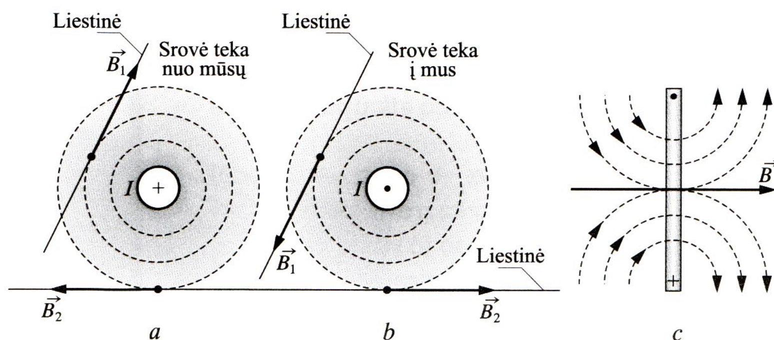
$$B = \frac{F_{max}}{Il}; \qquad (218)$$

čia F_{max} – maksimali jėga, kuria magnetinis laukas veikia jame esantį laidininką, kai juo teka I stiprio elektros srovė; l – laidininko ilgis.

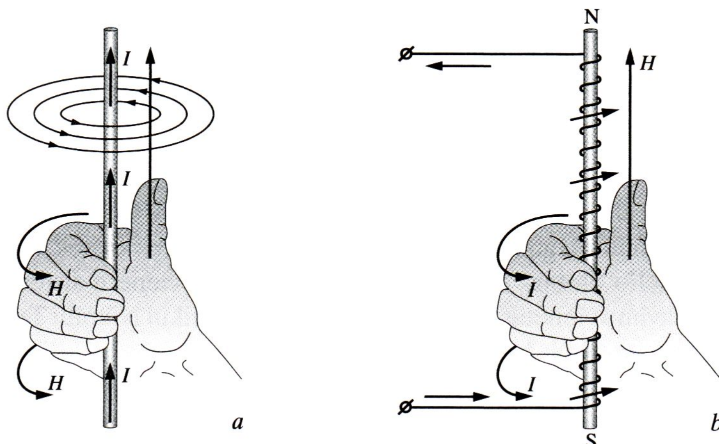
Magnetinio lauko indukcija $\vec{B}$ yra vektorinis dydis, nukreiptas indukcijos linijos liestine tame lauko taške. 198 paveiksle *a* ir *b* atvejais parodytos tiesiu laidininku, o *c* atveju – vija tekančios elektros srovės sukurto magnetinio lauko indukcijos linijų ir vektorių $\vec{B}$ kryptys.

Magnetinės indukcijos vektoriaus kryptis nustatoma pagal dešiniosios rankos taisyklę: dešiniąja ranka apimame laidininką taip, kad nykštys rodytų srovės tekėjimo kryptį, tuomet keturi pirštai rodys magnetinės indukcijos linijų, arba $\vec{B}$, kryptį.

Apskritiminės srovės arba solenoido magnetiniam laukui taikoma atvirkštinė taisyklė: dešine ranka reikia apimti ritę taip, kad pirštai rodytų srovės kryptį – tada ištiestas nykštys rodys magnetinio lauko linijų kryptį (šiaurės polių).



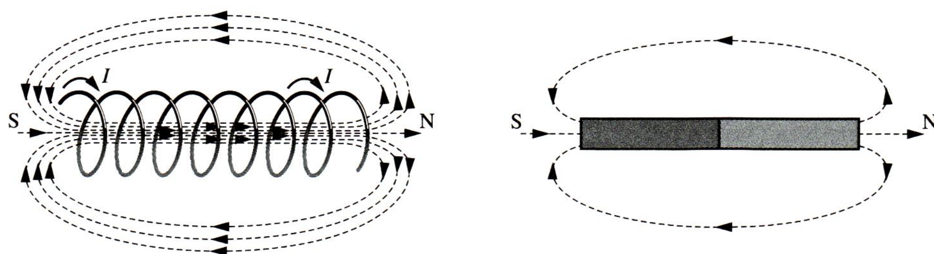
198 pav.



199 pav.

Dešiniosios rankos taisyklės taikymas parodytas 199 paveiksle: *a* atveju elektros srovė teka tiesiu laidininku, o *b* atveju – solenoidu.

Ritės magnetinis laukas panašus į tiesaus magneto lauką: indukcijos linijos išeina iš šiaurinio poliaus ir sueina į pietinį polių (200 pav.).



200 pav.

Pateiksime kelias būdingiausias formules magnetinio lauko indukcijai apskaičiuoti.

1. Tiesaus laido atkarpa (201 pav.) tekanti srovė sukuria taške *D*, nutolusiame nuo šio laido atstumu r_0, magnetinę indukciją, kurios didumas

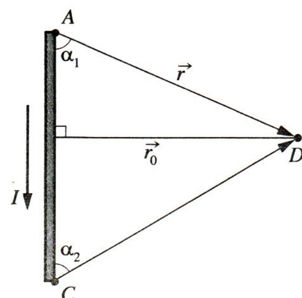
$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{I}{r_0}(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2); \qquad (219)$$

čia α_1 ir α_2 – kampai, kuriuos sudaro spinduliai – vektoriai, išvesti iš atkarpos galų į tašką *D*, su laido atkarpa; *I* – laido atkarpa tekančios srovės stipris.

Kai šis laidas labai ilgas, $\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2 \to 2$, todėl tiesaus begalinio laidininko, kuriuo teka srovė, kuriamo lauko magnetinė indukcija atstumu r_0 nuo jo yra

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r_0}; \qquad (220)$$

čia *I* – laidininku tekančios srovės stipris.

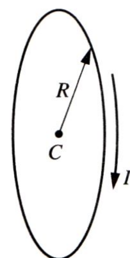


201 pav.

2. Vijos su srove magnetinio lauko indukcija vijos centre (202 pav.) yra

$$B_c = \frac{\mu\mu_0}{2}\frac{I}{R};\qquad(221)$$

čia R – vijos spindulys, I – vija tekančios srovės stipris.

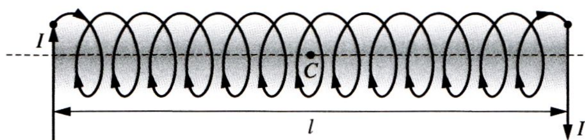


202 pav.

3. Magnetinė indukcija solenoido (ritės, kurios ilgis l yra daug didesnis už jos vijų spindulį) centre (203 pav.) yra

$$B_c = \mu\mu_0\frac{NI}{l};\qquad(222)$$

čia l – solenoido ilgis, N – vijų skaičius, I – solenoidu tekančios srovės stipris.



203 pav.

Grafiškai vaizduojant magnetinį lauką, indukcijos linijų tankis turi būti proporcingas magnetinės indukcijos vertei. Jeigu kurioje nors vienalyčio lauko vietoje indukcija lygi B teslų, tai toje vietoje pro statmeno linijoms vienetinio ploto paviršių galima brėžti, pavyzdžiui, taip pat B linijų. Tuomet pro visą paviršių, kurio plotas lygus S, eis BS magnetinių linijų. Šitaip gauname naujo fizikinio dydžio – *magnètinio sraũto* – grafinį vaizdą (204 pav.).

Paviršiaus plotelį ΔS kertantis magnetinis srautas ($\Delta\Phi$) lygus indukcijos vektoriaus projekcijai plotelio normalėje, padaugintai iš plotelio dydžio:

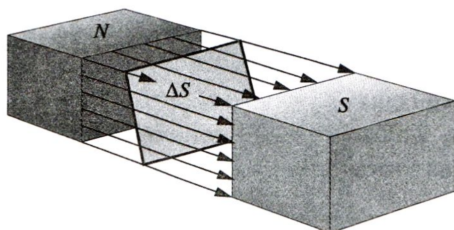
$$\Delta\Phi = B_n\Delta S = B\Delta S\cos\alpha;\qquad(223)$$

čia α – kampas tarp plotelio normalės $\vec{n}$ ir vektoriaus $\vec{B}$ krypčių (205 pav.).

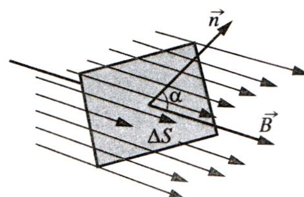
Kai laukas vienalytis, tai paviršiaus plotą S kertantis magnetinis srautas išreiškiamas formule

$$\Phi = BS\cos\alpha.$$

Tarptautinėje SI vienetų sistemoje magnetinis srauto matavimo vienetas vadinamas *vėberiu* (Wb) – vokiečių fiziko Vilhelmo Vėberio (*Weber*; 1804–1891) garbei. $[\Phi] = 1\ \mathrm{T}\cdot 1\ \mathrm{m}^2 = 1\ \mathrm{Wb}$.



204 pav.



205 pav.

Magnetinis srautas lygus 1 Wb, kai 1 m^2 ploto rėmelius statmenai kerta vienalytis magnetinis laukas, kurio indukcija lygi 1 T.

Būtent su magnetiniu srautu (kaip vėliau įsitikinsime) susijusi magnetinio lauko energija. Kintant šiam srautui, vyksta energijos virsmas ir atliekamas darbas. Todėl magnetinio srauto sąvoka labai svarbi nagrinėjant elektromagnetinius reiškinius.

Klausimai ir užduotys

1. Kokios sąveikos vadinamos magnetinėmis?

2. Išvardykite pagrindines magnetinio lauko savybes.

3. Kokiais būdais galima nustatyti magnetinės indukcijos vektoriaus kryptį?

4. Ką vadiname magnetinės indukcijos linijomis?

5. Kokius laukus vadiname sūkuriniais?

6. Kuo sūkurinis laukas skiriasi nuo potencialinio?

7. Tiesiu laidininku teka 13,2 A srovė. Apskaičiuokite magnetinio lauko indukciją taške, kuris yra ore 9,2 cm atstumu nuo to laidininko.

8. 85 cm ilgio solenoidu, sudarytu iš 750 vijų ir neturinčiu šerdies, teka 5,6 A stiprio srovė. Apskaičiuokite magnetinio lauko indukciją solenoido viduje; jo skersmenį laikykite labai mažu, palyginti su ilgiu.

9. Dviem ilgais lygiagrečiais laidais teka vienodos krypties ir vienodo stiprio elektros srovės. Atstumas tarp laidų lygus r. Koks yra atstojamasis magnetinės indukcijos vektorius taške A, kurio atstumas nuo vieno ir kito laido lygus $\frac{r}{2}$?

10. Vienalyčiame magnetiniame lauke yra stačiakampis 20 mm^2 × 30 mm^2 matmenų rėmelis, turintis 100 vijų, kuriomis teka 5 A elektros srovė. Kokia yra lauko magnetinė indukcija, jeigu didžiausias rėmelio sukimo momentas lygus $3 \cdot 10^{-3}$ Nm?

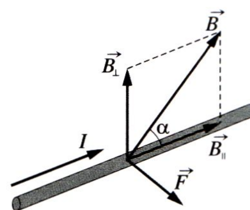
11. Kokio stiprio elektros srovė teka laidininku, jeigu jis traukia kitą lygiagretų 2,8 m ilgio laidininką 3,4 mN jėga, kai pastaruoju teka 58 A srovė? Kokiomis kryptimis teka srovės abiem laidininkais? Atstumas tarp laidininkų lygus 12 cm. Oro magnetinę skvarbą laikykite lygia μ_0.

12. Du lygiagretūs labai ilgi tiesūs laidininkai nutiesti vakuume 4 cm atstumu vienas nuo kito. Vienu jų teka 25 A, o kitu – 5 A stiprio elektros srovė. Kokio ilgio laidininko atkarpą veikia 1,2 mN jėga?

13. Kokio stiprio elektros srovė teka 64 cm solenoidu, sudarytu iš 820 vijų ir neturinčiu šerdies, jeigu magnetinio lauko indukcija jo viduje lygi 1,2 mT? Solenoido skersmuo yra mažas, palyginti su ilgiu.

14. 5,2 cm spindulio apskritas laidininkas, kuriuo teka 13,4 A srovė, ir tiesus laidininkas, kuriuo teka 22 A srovė, yra vienoje plokštumoje, ore. Atstumas tarp tiesaus laidininko ir apskrito laidininko centro lygus 8,3 cm. Apskaičiuokite magnetinio lauko indukciją apskrito laidininko centre. Kokia bus lauko indukcija tame pačiame taške, pasikeitus tiesiu laidininku tekančios srovės krypčiai?

88. Ampero dėsnis



206 pav.

§ 87 užrašėme magnetinės indukcijos eksperimentinę išraišką (218), pagal kurią $B = \frac{F_{max}}{Il}$. Šią formulę galima taikyti apskaičiuojant modulį didžiausios *Ampèro jėgõs*, veikiančios magnetiniame lauke, kurio indukcija $\vec{B}$, esantį tiesų laidininką, kai juo teka elektros srovė: $\vec{F}_{max} = I\vec{B}l$; čia l – laidininko ilgis; I – elektros srovės stipris.

Bandymais nustatyta: kai laidininkas, kuriuo teka srovė, sudaro kampą α su magnetinės indukcijos vektoriumi $\vec{B}$ (206 pav.), Ampero jėgos modulis randamas pagal formulę

$$F = |I| Bl \sin\alpha. \tag{224}$$

Ši išraiška vadinama *Ampero dėsniu*.

Ampèro jėgà lygi magnetinės indukcijos vektoriaus, srovės stiprio, laidininko atkarpos ilgio ir kampo tarp magnetinės indukcijos bei laidininko atkarpos sinuso sandaugai.

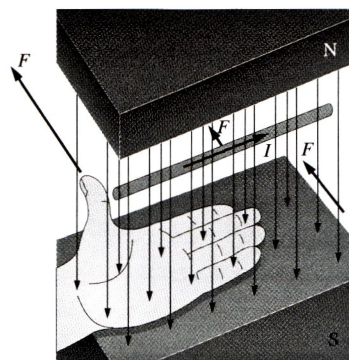
Ampero jėgos vektoriaus $\vec{F}$ kryptis nustatoma pagal kairiosios rankos taisyklę: **kairę ranką reikia ištiesti taip, kad magnetinės linijos eitų statmenai į delną, o ištiesti pirštai rodytų srovės kryptį. Tada delno plokštumoje stačiu kampu atlenktas nykštys rodys laidininką veikiančios jėgos kryptį** (207 pav.).

Žinome, kad laidininką, kuriuo teka srovė, magnetinis laukas veikia jėga $F = BIl$. Jeigu laidininkas pasislinko jėgos kryptimi atstumu d (207 pav.), tai buvo atliktas darbas $A = Fd$ arba $A = BIld$. Tačiau sandauga $ld = S$ – tai plotas, pro kurį einančias magnetines linijas kirto laidininkas, o sandauga $BS = \Delta\Phi$ – magnetinis srautas, kurį jis kirto. Taigi

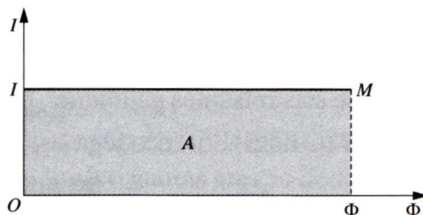
$$A = IBS \text{ arba } A = I\Delta\Phi. \tag{225}$$

Darbas, atliekamas judant magnetiniame lauke laidininkui, kuriuo teka elektros srovė, yra lygus tos srovės stiprio ir magnetinio srauto, kurį kerta laidininkas, sandaugai.

208 paveiksle šis darbas A grafiškai vaizduojamas stačiakampio $OIM\Phi$ plotu.



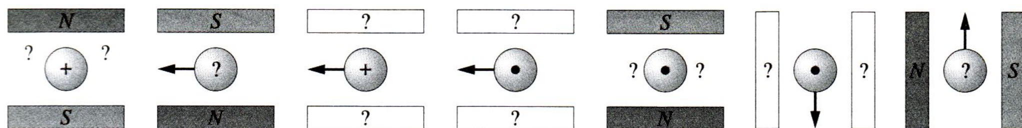
207 pav.



208 pav.

Klausimai ir užduotys

1. Pritaikę kairiosios rankos taisyklę, nustatykite paveiksluose nenurodytas kryptis.



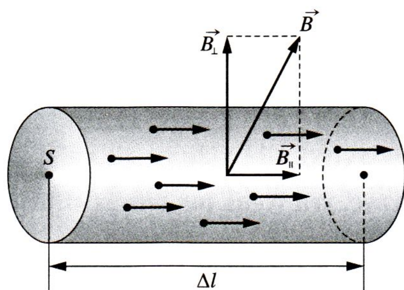
2. Vienalyčiame 0,82 T magnetiniame lauke yra tiesus laidininkas, statmenas jėgų linijoms. Jo ilgis 128 cm. Kokia jėga veikia laidininką, kai juo teka 18 A srovė?

3. Vienalyčiame magnetiniame lauke, kurio indukcija $15 \cdot 10^{-2}$ T, esantis 0,5 m ilgio laidininkas pasislenka 1,2 m. Kampas tarp elektros srovės krypties ir magnetinės indukcijos vektoriaus lygus 30°, o elektros srovės stipris – 5 A. Kokį darbą atlieka magnetinis laukas slenkant laidininkui, jeigu pastarasis slenka veikiančios jėgos kryptimi?

4. 2 kg masės ir 0,5 m ilgio tiesus laidininkas yra magnetiniame lauke. Jis statmenas to lauko indukcijos linijoms. Kokio stiprio elektros srovė turi tekėti laidininku, kad jis laisvai kybotų ir nekristų? Laukas vienalytis, jo indukcija lygi 15 T.

89. Lorenco jėga

Jėga, kuria magnetinis laukas veikia jame judantį krūvininką, vadinama Lòrenco jėgà. Taip buvo pagerbtas įžymus olandų fizikas, elektroninės medžiagų sandaros kūrėjas H. A. Lorencas (*Lorentz*; 1853–1928).

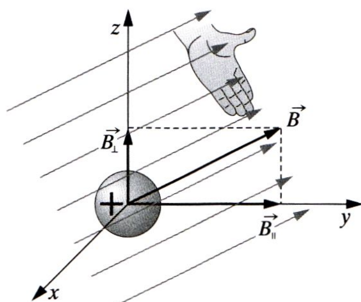


209 pav.

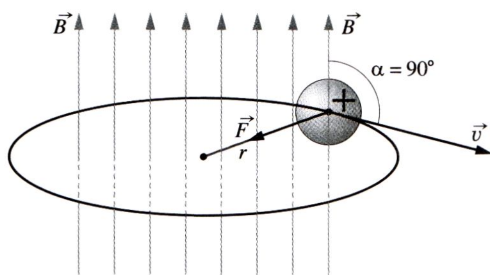
Kai krūvininkai (elektringosios dalelės) juda tiesiu laidininku, patalpintu į magnetinį lauką (209 pav.), juos veikiančių magnetinių jėgų suma lygi Ampero jėgai: $NF = F_A$; čia N – judančių krūvininkų (elektringųjų dalelių) skaičius. Metaluose juda laisvieji elektronai, kurių krūvis $q = e$, o skaičius $N = nSl$; čia n – elektronų koncentracija, S – laidininko skerspjūvio plotas, l – jo ilgis. Taigi: $F_L = \frac{F_A}{N}$. Žinome, kad Ampero jėga $F_A = IBl \sin\alpha$, o $I = envS$. Įrašę šias reikšmes gauname: $F_L = \frac{envSlB \sin\alpha}{N}$. Bet $V = Sl$ ir $N = nV$, todėl $F_L = evB \sin\alpha$. Taigi Lorenco jėga bet kuriam krūvininkui

$$F_L = |q|vB \sin\alpha. \qquad (226)$$

Dalelę veikiančios jėgos kryptis, kaip ir Ampero jėgos kryptis, randama pagal jau žinomą kairiosios rankos taisyklę (210 pav.): kairę ranką reikia ištiesti taip, kad magne-



210 pav.



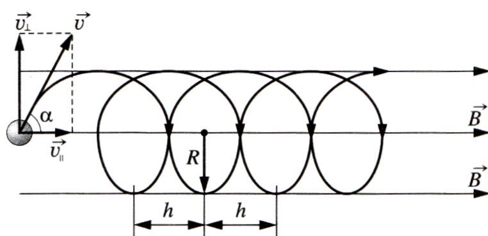
211 pav.

tinės indukcijos $\vec{B}$ dedamoji, statmena krūvio greičiui, būtų nukreipta į delną, o keturi pirštai rodytų teigiamosios dalelės judėjimo (greičio) kryptį, tuomet 90° kampu ištiestas nykštys rodys veikiančios jėgos kryptį. Neigiamojo krūvio dalelę veiks priešingos krypties jėga.

Kai elektringoji dalelė juda vienalyčiame magnetiniame lauke statmenai jo linijoms $(\vec{B} \perp \vec{v})$, tai ji, veikiama Lorenco ir centrinės jėgų, judės apskritimu, kurio spindulys r (211 pav.). Vadinasi, $\frac{mv^2}{r} = qvB$. Iš čia išreikškime r : $r = \frac{mv}{qB}$, čia m – elektringosios dalelės masė, v – jos greitis, q – elektringosios dalelės krūvis.

Tokio spindulio lanku dalelės juda specialiuose greitintuvuose – *ciklotrònuose*. Iš formulės matyti, kad kuo didesnė dalelės masė arba greitis, tuo didesnis trajektorijos kreivumo spindulys – magnetinis laukas mažiau iškreipia dalelės trajektoriją. Kita vertus, kuo didesnis dalelės krūvis arba magnetinio lauko indukcija, tuo mažesnis kreivumo spindulys, magnetinis laukas labiau iškreipia dalelės trajektoriją.

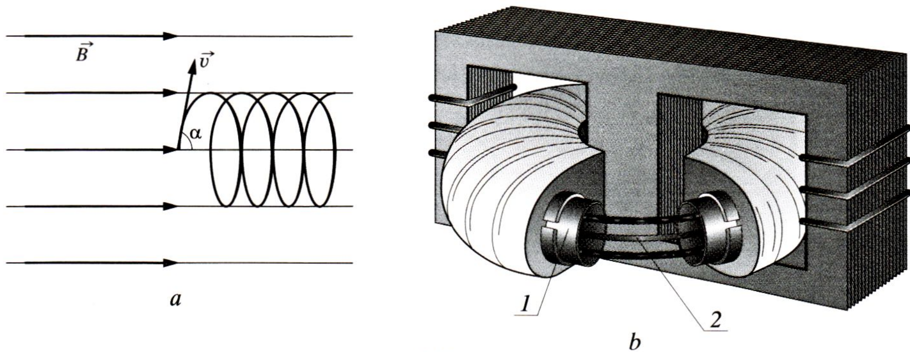
Jeigu, dalelei įlekiant į magnetinį lauką, greičio vektoriaus kryptis sudarys su magnetinio lauko jėgų linijų kryptimi kampą α (0° < α < 90°), tai ji ne tik pradės suktis, bet dar ir judės išilgai magnetinių jėgų linijų spirale arba, kitaip tariant, sraigtine linija (212 pav.).



212 pav.

Jei $\vec{v}_{\perp}$ – statmenoji elektringosios dalelės greičio dedamoji, $\vec{v}_{\parallel}$ – lygiagrečioji greičio dedamoji, h – sraigtinės linijos žingsnis, T – elektringosios dalelės apsisukimo periodas, B – magnetinė indukcija, R – vijos spindulys, tai $v = \sqrt{v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2}$ (*a*) ir $qv_{\perp}B = \frac{mv_{\perp}^2}{R}$, o iš čia $v_{\perp} = \frac{qBR}{m}$ (*b*). Sraigtinės linijos žingsnis $h = v_{\parallel}T$ (*c*), o žinome, kad $T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{qB}$ (d), tai, pastarąją lygtį įrašę į *c*, gausime $v_{\parallel} = \frac{hqB}{2\pi m}$ (*e*). Norint apskaičiuoti sraigtine trajektorija judančios dalelės greitį, reikia į *a* lygtį įrašyti gautas greičio dedamųjų $\vec{v}_{\perp}$ ir $\vec{v}_{\parallel}$ išraiškas:

$$v = \frac{qB}{m}\sqrt{R^2 + \frac{h^2}{4\pi^2}}. \qquad (227)$$



213 pav.

Vakuuminėje žiedinėje kameroje *1*, esančioje magnetiniame lauke, kurio magnetinės indukcijos linijos *2* nukreiptos išilgai kameros sienelių, elektringosios dalelės juda spirale apie indukcijos linijas ir nesusiduria su kameros sienelėmis (213 pav.). Tokios kameros įrengiamos *tokamãkuose*, kurie kuria dešimčių milijonų laipsnių temperatūros plazmą.

Kadangi Lorenco jėga yra statmena dalelės greičiui, tai darbo ji neatlieka. Pagal kinetinės energijos teoremą (atliktas darbas lygus kinetinės energijos pokyčiui), tai reiškia, kad **Lorenco jėga nekeičia dalelės kinetinės energijos, vadinasi, ir jos greičio modulio. Kinta tik Lorenco jėgos veikiamos dalelės greičio kryptis.**

Kai dalelė patenka į elektromagnetinį lauką, tai ją veikiančios jėgos modulis užrašomas taip:

$$F = qE + |q|vB\sin\alpha; \tag{228}$$

čia q – dalelės krūvis; v – dalelės greitis; E – elektrinio lauko stipris; B – magnetinio lauko indukcija; α – kampas tarp dalelės greičio $\vec{v}$ ir magnetinės indukcijos $\vec{B}$.

Šioje lygtyje pirmasis dėmuo išreiškia dydį jėgos, veikiančios krūvininką elektriniame lauke, antrasis – dydį Lorenco jėgos, veikiančios magnetiniame lauke: $\vec{F} = \vec{F}_{el} + \vec{F}_L$. Elektrinė jėga krūvininką veikia nepriklausomai nuo jo judėjimo krypties. Magnetinė jėga yra didžiausia, kai krūvininkas juda statmenai indukcijos linijoms ($\alpha = 90°$), ir lygi nuliui, kai krūvininkas juda išilgai indukcijos linijų ($\alpha = 0°$ arba $180°$).

Dalelės, judančios magnetiniame lauke, nukrypimas nuo tiesaus kelio priklauso nuo jos masės. Tuo remiantis, gana tiksliai nustatomos elektringųjų dalelių masės. Šiam tikslui skirtas prietaisas vadinamas *mãsių spektrografù*. Juo atskiriami ir ištiriami izotopai; juo buvo nustatyta elektrono ir protono masė. Šie eksperimentai labai svarbūs vykdant branduolinius tyrimus.

Lorenco jėgos veikimu pagrįsta ir *ciklotròno* konstrukcija. Tai – prietaisas, skirtas elektringosioms dalelėms pagreitinti, kad jos įgytų energiją, reikiamą branduolinėms reakcijoms sukelti. Elektringosios dalelės skrieja spiraline trajektorija ciklotrono magnetiniame lauke, nes, didėjant greičiui, didėja ir trajektorijos spindulys. Įgijusios reikiamos energijos, dalelės nukreipiamos į reikiamą objektą. Taip fizikams susidaro galimybės prasiskverbti į materijos gelmes ir tirti nuostabų elementariųjų dalelių pasaulį. Be to, Lorenco jėga valdo dalelių judėjimą elektroniniuose vamzdžiuose, elektroniniuose mikroskopuose ir daugelyje kitų šiuolaikinių prietaisų.

Klausimai ir užduotys

1. Kokia yra Lorenco jėgos modulio vertė?

2. Kaip vienalyčiame magnetiniame lauke juda elektringoji dalelė, kurios pradinis greitis statmenas magnetinės indukcijos linijoms?

3. Kaip nustatoma Lorenco jėgos kryptis?

4. Kodėl Lorenco jėga keičia elektringosios dalelės greičio kryptį, bet nekeičia jo modulio?

5. Protonas juda tiesia trajektorija erdvėje, kurioje egzistuoja vienalyčiai ir nuolatiniai (pastovūs) – elektrinis ir magnetinis – laukai. Žinoma, kad elektrinio lauko stipris lygus $\vec{E}$. Nustatykite magnetinio lauko indukciją.

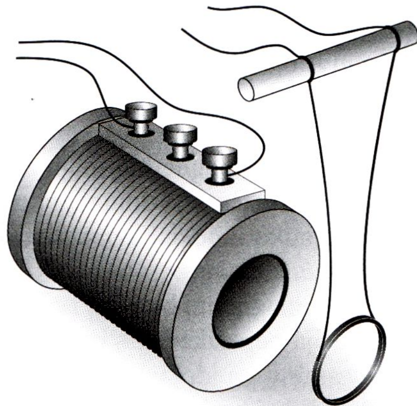
6. Elektronas įlekia į vienalytį magnetinį lauką 50 000 km/s greičiu, kurio vektorius sudaro 30° kampą su indukcijos linijomis. Lauko indukcija 0,8 T. Kokia jėga veikia elektroną?

7. Elektronas įlekia į vienalytį $2 \cdot 10^{-4}$ T indukcijos magnetinį lauką $2 \cdot 10^{6}$ m/s greičiu statmenai lauko jėgų linijoms. Kokio spindulio apskritimu jis judės?

8. Ciklotronas pagreitina protonus iki 5 MeV energijos. Kokio didžiausio spindulio orbita jie judės, jeigu magnetinio lauko indukcija lygi 1 T?

90. Medžiaga magnetiniame lauke

Elektrostatinė nejudančių krūvių sąveika priklauso nuo aplinkos, kurioje yra krūviai. Bandymais nustatyta, kad nuo aplinkos priklauso ir srovių magnetinė sąveika. Jeigu greta didelės ritės ant dviejų plonų laidų pakabintume antrą nedidelę ritę (214 pav.) ir prijungtume jas prie srovės šaltinio, pamatytume, kad mažoji ritė nukrypsta nuo vertikalios padėties. Į didžiąją ritę įkišus geležinį strypą, mažoji ritė nukrypsta dar didesniu kampu. Vadinasi, mažąją ritę veikia didesnė Ampero jėga. Tai rodo, kad didžiąja rite tekančios srovės sukurto magnetinio lauko indukcija padidėja dėl geležinės šerdies. **Medžiagos, kurios smarkiai sustiprina išorinį magnetinį lauką, vadinamos feromagnètikais.** Be geležies, prie feromagnetikų priskiriamas nikelis, kobaltas ir kai kurie šių metalų bei kitų elementų junginiai.



214 pav.

Fizikinis dydis, kuris parodo, kiek kartų magnetinio lauko indukcija $\vec{B}$ vienalytėje aplinkoje skiriasi nuo magnetinio lauko indukcijos $\vec{B}_0$ vakuume, vadinamas magnètine skvarbà ir žymimas **μ:**

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \qquad (229)$$

Feromagnetikų magnetinės skvarbos vertė siekia keletą dešimčių, šimtų ir net tūkstančių vienetų.

Į didžiąją ritę įkišę vario, aliuminio, stiklo, porceliano, medžio strypus, nepastebėsime mažosios ritės nuokrypio pokyčio. Tačiau, atliekant eksperimentus su jautresniais prietaisais, galima nustatyti, kad visos medžiagos keičia magnetinį lauką. Pagal poveikio išoriniam magnetiniam laukui pobūdį neferomagnetinės medžiagos skirstomos į *paramagnètikus ir diamagnètikus*.

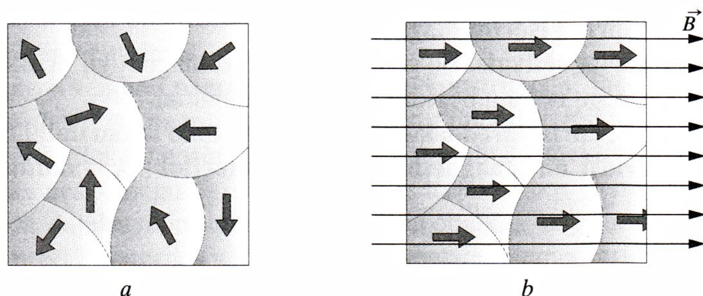
Paramagnètikais vadinamos medžiagos, sukuriančios silpną magnetinį lauką, kurio kryptis sutampa su išorinio lauko kryptimi. Net labai stiprių paramagnetikų magnetinė skvarba mažai skiriasi nuo vieneto: platinos $\mu = 1{,}00036$, skysto deguonies $\mu = 1{,}0034$.

Diamagnètikais vadinamos medžiagos, sukuriančios lauką, kuris susilpnina išorinį magnetinį lauką. Pavyzdžiui, diamagnetinėmis savybėmis pasižymi sidabras, švinas, kvarcas. Diamagnetikų magnetinė skvarba skiriasi nuo vieneto ne daugiau kaip dešimttūkstantosiomis dalimis. Stipriausio diamagnetiko – bismuto $\mu = 0{,}999824$.

Feromagnetizmas paaiškinamas magnetinėmis elektronų savybėmis. Elektronas ekvivalentus apskritiminei srovei arba besisukančiam įelektrintam kūnui, todėl turi savąjį magnetinį lauką. Daugelio kristalų elektronų magnetiniai laukai vieni kitus kompensuoja, nes jie orientuoti poromis antilygiagrečiai. Tik kai kurių kristalų, pavyzdžiui, geležies, elektronų savieji magnetiniai laukai orientuoti lygiagrečiai. Dėl to feromagnetiko kristale atsiranda savaime įsimagnetinusios 10^{-2}–10^{-4} cm skersmens sritys. Jos vadinamos *domènais* (215 pav., *a*). Atskirų domenų magnetiniai laukai yra skirtingų krypčių ir dideliame kristale vienas kitą kompensuoja. Feromagnetinį bandinį įnešus į išorinį magnetinį lauką, atskirų domenų magnetiniai laukai orientuojasi tvarkingai.

Didėjant išorinio lauko magnetinei indukcijai $\vec{B}$, vis daugiau domenų orientuojasi tvarkingai – magnetinė indukcija $\vec{B}$ didėja. Išorinio lauko indukcijai padidėjus iki tam tikros vertės, visi domenai orientuojasi tvarkingai (215 pav., *b*) ir, toliau didėjant išorinio lauko indukcijai, magnetinė indukcija nustoja didėti. Šis reiškinys vadinamas *magnètiniu sótinimu*.

Feromagnetinį bandinį išnešus iš išorinio lauko, didelės dalies domenų tvarkinga orientacija nepasikeičia – bandinys tampa nuolatiniu magnetu. Nuolatiniams magnetams gaminti naudojamas plienas, geležies ir aliuminio, nikelio bei kobalto junginiai, geležies ir kai kurių kitų metalų oksidai.



215 pav.

Tvarkingą domenų orientaciją feromagnetike suardo šiluminiai kristalo atomų virpesiai. Kuo aukštesnė kristalo temperatūra, tuo greičiau sutrinka domenų orientacija, ir bandinys išsimagnetina. Temperatūra, kurioje medžiaga virsta ne feromagnetiku, vadinama *Kiurì temperatūrà*. Geležies Kiuri temperatūra lygi 770 °C, kobalto – 1130 °C, nikelio – 356 °C. Kaip išnyksta iki aukštos temperatūros įkaitintos geležies feromagnetinės savybės, galima pamatyti atliekant bandymą su skutimosi peiliuku, prilipusiu prie magneto. Pakaitinus peiliukas nukris nuo magneto.

Feromagnetinės medžiagos, kuriomis magnetinius laukus galima sustiprinti dešimtis tūkstančių kartų, dabar plačiai taikomos technikoje. Plieninė šerdis yra viena svarbiausių elektros generatoriaus ir variklio, elektromagneto ir transformatoriaus detalių. Plonu feromagnetinių miltelių sluoksniu padengta lanksti juosta naudojama garsui įrašyti ir atgaminti magnetiniu būdu.

Klausimai ir užduotys

1. Įmagnetinti du vienodi virbalai. Kaip, nesinaudojant jokiomis priemonėmis, nustatyti, kuris virbalas daugiau įmagnetintas?

2. Kaip reikia laikyti du vienodus magnetus, kad jie neprarastų magnetinių savybių?

3. Kodėl plieninis strypelis, kalamas plaktuku, padarytu iš nemagnetinės medžiagos, kartais įsimagnetina? Kada taip gali būti?

4. Kodėl prie elektromagneto šerdies galo kartais prilydoma varinė plokštelė?

5. Kokios magnetinės savybės būdingos feromagnetinių, paramagnetinių ir diamagnetinių medžiagų atomams, kai jų neveikia išorinis magnetinis laukas?

6. Kodėl feromagnetinių ir paramagnetinių medžiagų magnetinės savybės magnetiniame lauke sustiprėja, o diamagnetinių – susilpnėja?

7. Kaip feromagnetikus paversti paramagnetikais?

91. Žemės magnetinis laukas

Gilberto idėja, kad Žemės branduolys yra didžiulis magnetas, nebuvo be priekaištų. Pats Gilbertas buvo nustatęs, kad pakaitintas magnetas praranda savo galias. O juk iš ugnikalnių išsiveržimų buvo žinoma, kad Žemės gelmės yra smarkiai įkaitusios. Vis dėlto Gilbertas, kaip ir kai kurie kiti fizikai, dėl tokio prieštaravimo neatsisakė gražios ir, svarbiausia, stebimus reiškinius atitinkančios – idėjos, palikdamas išspręsti tą prieštaravimą vėlesnėms fizikų kartoms.

Faradėjui įrodžius, kad magnetinį lauką gali sukurti ne tik magnetas, bet ir elektros srovė, įsigalėjo hipotezė, kad Žemės magnetines savybes lemia jos skystame įkaitusiame branduolyje susidariusios elektros srovės. Tas sroves gali sukelti tiek Žemės sukimasis, tiek šilumos konvekcija iš planetos gelmių į išorę. Dėl milžiniško Žemės dydžio pakanka net mažesnio negu vienas milimetras per sekundę srovių greičio, kad jos sukurtų tokį Žemės magnetinį lauką, koks yra dabar (apie $5 \cdot 10^{-5}$ T). Vis dėlto

ligi šiol nėra suformuluotos griežtos teorijos, paaiškinančios šio lauko atsiradimą ir ypatybes.

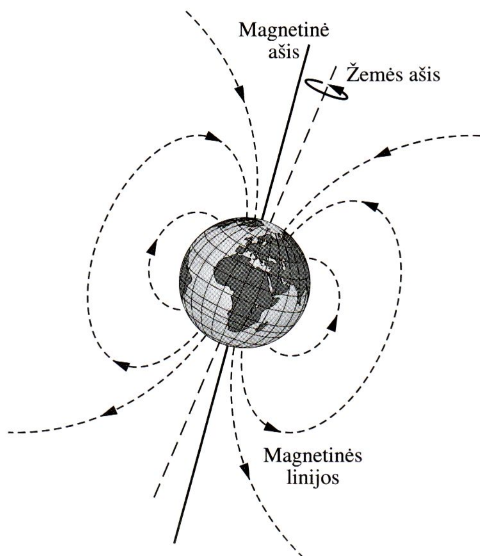
Dar XVII a. buvo pastebėta, kad Žemės magnetinis laukas kinta. Per paskutinįjį šimtmetį jis susilpnėjo maždaug 2,5%, o magnetinių polių padėtys pasislinko apie 200 km. Dabar pietinis magnetinis polius (traukiantis šiaurinį kompaso rodyklės polių) yra prie Karalienės Elžbietos salų, Kanados šiaurėje, 1600 km atstumu nuo Šiaurės ašigalio, o šiaurinis polius – pasislinko tiek pat į pietus nuo Australijos.

Pasirodo, galima atsekti, kur buvo Žemės magnetiniai poliai net prieš milijonus metų. Kai kurios uolienos, turinčios savyje magnetito, įsimena Žemės magnetinį lauką jo formavimosi metu, o jautrūs prietaisai leidžia nustatyti tą geležies atomų orientaciją. Matavimų įvairiose planetos vietose rezultatai sutampa. Jie liudija, kad Žemės magnetiniai poliai ne tik nuolat juda, bet retkarčiais net susikeičia vietomis – paskutinis toks polių apsivertimas įvyko prieš 700 000 metų.

Per Žemės magnetinius polius išvesti apskritimai vadinami magnètiniais dienóvidiniais arba magnètiniais meridiãnais. Magnetinio dienovidinio kryptimi nusistovi kompaso magnetinė rodyklė.

Kampas tarp geografinio ir magnetinio dienovidinių bet kuriame Žemės paviršiaus taške vadinamas magnètine deklinãcija. Vilniuje magnetinė deklinacija yra 1° į rytus. Taigi kompasas tik apytiksliai rodo šiaurės–pietų kryptį.

216 paveiksle matyti, kad Žemės magnetinio lauko linijos yra nelygiagrečios Žemės paviršiui. Jeigu magnetinė rodyklė įtaisyta taip, kad gali laisvai sukiotis dar ir apie horizontalią ašį, tai jos šiaurės polius nukrypsta žemyn (217 pav.). Tai suprantama – rodyklė šiuo atveju rodo jau ne dienovidinio, o tiesiog magnetinės linijos kryptį. **Magnetinės rodyklės nuokrypio nuo horizontalios plokštumos kampas vadinamas magnètine inklinãcija.** Magnetiniame pusiaujyje inklinacija lygi 0°, magnetiniuose poliuose – 90° (rodyklė statmena horizonto plokštumai). Vilniuje magnetinė inklinacija lygi 68°28′.



216 pav.



217 pav.

Žemės magnetinio lauko stipris, magnetinė deklinacija ir inklinacija vadinami Žẽmės magnètinio laũko elemeñtais.

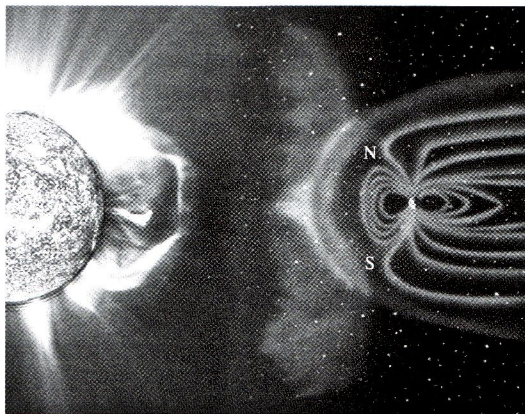
Šių elementų vertės įvairiose Žemės paviršiaus vietose atsispindi magnetiniuose žemėlapiuose. Magnetiniai žemėlapiai vartojami jūrų ir oro navigacijoje, geologijoje, ieškant naudingųjų iškasenų. Lietuvos magnetinį žemėlapį 1930 m. pradėjo sudarinėti akademikas Povilas Brazdžiūnas.

Tiriant geomagnetinį lauką, žemės paviršiuje aptinkama vietų, kur magnetinė rodyklė nuolat nukrypusi nuo tai vietai normalios krypties. Jos vadinamos magnetinės anomalijos sritimis. Pavyzdžiui, žinomos didelės Rytų Sibiro, Rytų Europos, Brazilijos, Kursko srities ir kitos anomalijos, kurių priežastis – palyginti negiliai slūgsantys milžiniški geležies rūdos klodai.

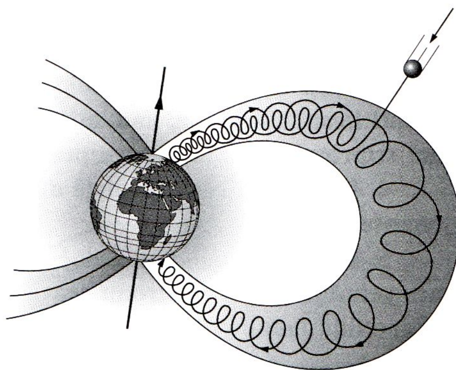
1936 m. Kauno universiteto profesorius K. Sleževičius (1890–1953), atlikdamas tyrimus Lietuvos magnetiniam žemėlapiui sudaryti, Tumasonių (Rokiškio raj.) kaimo apylinkėje aptiko didžiausią Pabaltijyje magnetinę anomaliją. Šią anomaliją sukelia Žemėje (apie 1200 m gylyje) esantys geležies rūdos sluoksniai.

Netaisyklingi trumpalaikiai Žemės magnetinio lauko sutrikimai vadinami magnètinėmis áudromis. Magnetinės audros susijusios su Saulės aktyvumo padidėjimu. Dėl jų suintensyvėja poliarinės pašvaistės, pablogėja trumpabangis radijo ryšys, troposferoje kyla ciklonai.

Ilgą laiką buvo spėjama, kad geomagnetinis laukas panašus į tiesaus magneto lauką: išėjusios iš Žemės gelmių magnetinės linijos nutolsta kosminėje erdvėje tūkstančius kilometrų ir grįžta į Žemę kitame jos pusrutulyje (216 pav.). Tačiau 1958 m. atlikti kosminiai tyrimai parodė, kad Žemės magnetinis laukas nėra simetriškas. Jį deformuoja Saulės skleidžiamas greitų elektringųjų dalelių (protonų ir elektronų) srautas, pavadintas *Sáulės vė́ju*. Judančių dalelių kuriamiems magnetiniams laukams sumuojantis su Žemės magnetiniu lauku, pastarasis Saulės pusėje tarsi susispaudžia, o priešingoje pusėje ištįsta (218 pav., *a*), lyg būtų „nupučiamas“. **Žemės rutulį supanti erdvė, kurioje pasireiškia geomagnètinis laũkas, vadinama magnetosferà.**



a



b

218 pav.

Remiantis pirmųjų dirbtinių Žemės palydovų duomenimis, buvo nustatyta, kad kosminėje erdvėje aplink Žemę yra sritys, kuriose susitelkusi daugybė elektringųjų dalelių. Tai paaiškinama Žemės magnetinio lauko poveikiu. Elektringąsias daleles, lekiančias iš kosmoso link Žemės, „pagauna" Žemės magnetinis laukas, ir jos ima skrieti spiralėmis apie magnetines linijas (218 pav., *b*). Dėl to elektringosios dalelės susikaupia tam tikrose srityse, vadinamosiose *radiãcijos júostose*. Žemę supa dvi radiacijos juostos, keliančios papildomą pavojų kosminiams skrydžiams: vidinė – 2400 km aukštyje ir išorinė – 12 000 km aukštyje (218 pav., *a*). Radiacijos juostoje esančių dalelių energija lygi 10^{15}–10^{16} J. Maždaug tiek energijos išsiskiria sprogus branduolinei bombai. Taigi Žemės magnetinis laukas, tarsi gigantiška skraistė, saugo gyvybę Žemėje nuo pražūtingo kosminio spinduliavimo.

Tarptautinių kosminių stočių ir kosminių laivų atlikti tyrimai rodo, kad magnetinį lauką turi ir kitos planetos – Jupiteris, Saturnas, Merkurijus, Marsas. Mėnulis ir Venera neturi magnetinio lauko, todėl apie juos neaptikta radiacijos juostų. Saulės magnetinis laukas yra dvigubai stipresnis negu Žemės.

Labiausiai įmagnetinti kūnai Visatoje yra žvaigždės, vadinamos *pulsãrais*. Magnetinė indukcija jų aplinkoje siekia 1000 MT.

Žemės magnetinis laukas padeda gyviesiems organizmams orientuotis erdvėje, suvokti laiką, rasti kelią migruojantiems paukščiams ir žuvims. Kai kurių augalų šaknų sistema išsidėsto išilgai Žemės magnetinių linijų. Ilgą laiką dirbtinai susilpnintas Žemės magnetinis laukas daro neigiamą įtaką gyvūnų ir augalų gyvybinei veiklai. Todėl magnetiniais reiškiniais domisi ne vien fizikai, bet ir biologai, orintologai, geologai, agronomai, medikai ir kitų mokslo sričių specialistai.

Klausimai ir užduotys

1. Jūrinių laivų plieniniai korpusai įsimagnetina Žemės magnetiniame lauke. Tokiam laivui priartėjus prie plaukiojančios magnetinės minos, ji sprogsta. Kad laivai išvengtų minų, jų korpusai apsukami kabeliu, kuriuo leidžiama elektros srovė. Paaiškinkite tokios laivų apsaugos esmę.

2. Kokiuose Žemės regionuose magnetinis kompasas nenaudojamas?

3. Kaip horizontalioje plokštumoje, atsižvelgiant į Žemės magnetinį lauką, pakreipti tiesų laidininką, kad, atliekant Erstedo bandymą, rodyklė, veikiama pakankamai stiprios srovės, nuo savo pradinės padėties nukryptų labiausiai?

4. Kodėl Šiaurės pašvaistė dažniausiai matoma poliariniuose Žemės rutulio rajonuose?

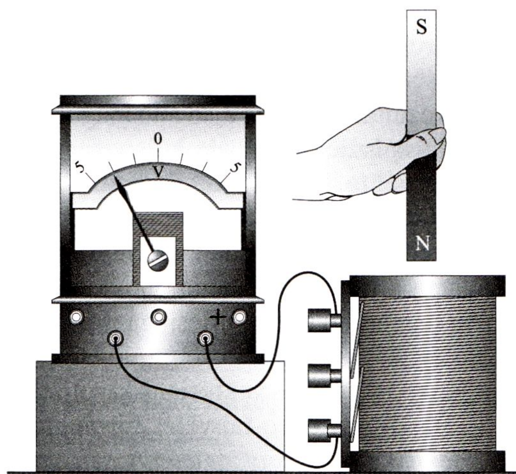
5. Buvo spėjama, kad Žemės magnetinį lauką sužadina žiedinė išsilydžiusio Žemės gelmių metalo elektronų srovė. Kokią elektronų judėjimo kryptį atitinka Žemės magnetinio lauko polių padėtis?

92. Elektromagnetinė indukcija. Elektromagnetinės indukcijos dėsnis. Lenco taisyklė

Jeigu elektros srovė, kaip parodė Erstedo bandymai, sukuria magnetinį lauką, tai ar negali magnetinis laukas sukurti elektros srovę laidininke? Daugelis mokslininkų bandymais mėgino atsakyti į šį klausimą, tačiau pirmasis tai padarė Maiklis Faradėjus (1791–1867).

1831 m. jis pastebėjo, kad, **kintant magnetiniam laukui, uždaru laidžiu kontūru pradeda tekėti srovė. Ji buvo pavadinta indukúotąja srovè.**

Indukuotoji srovė metalinės vielos ritėje atsiranda įdedant magnetą į ritę ir jį ištraukiant (219 pav.), taip pat keičiant srovės stiprumą antroje ritėje, kurios magnetinis srautas kerta pirmąją (220 pav.).

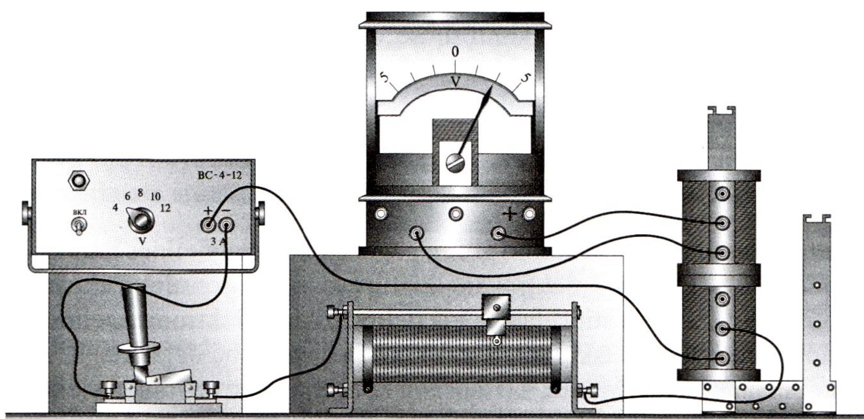


219 pav.

Elektros srovės atsiradimas uždarame laidžiame kontūre, kintant jį kertančiam magnetiniam laukui, vadinamas *elektromagnètine indùkcija*.

Uždaru kontūru tekanti elektros srovė rodo, kad kontūrą veikia pašalinės neelektrinės kilmės jėgos. Vadinasi, atsiranda indukuotoji elektrovara. Kiekybiškai elektromagnetinės indukcijos reiškinį paaiškina indukuotosios evj ir fizikinio dydžio, vadinamo *magnètiniu srautù*, sąryšis.

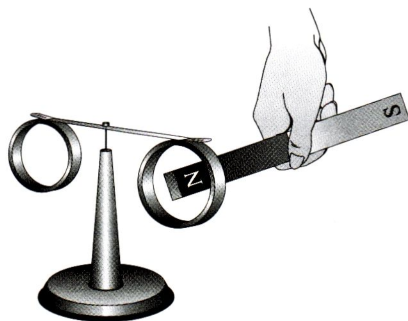
Bandymai rodo, kad indukuotosios srovės kryptis kontūre priklauso nuo to, didėja ar mažėja magnetinis srautas, kertantis uždarą kontūrą, taip pat nuo magnetinio lauko indukcijos vektoriaus krypties kontūro atžvilgiu. Apibendrintą taisyklę, pagal



220 pav.

kurią galima nustatyti indukuotosios srovės kryptį kontūre, 1833 m. suformulavo E. Lencas.

Lenco taisyklę galima akivaizdžiai pademonstruoti lengvu aliuminio žiedu (221 pav.). Bandymai rodo, kad, artinant nuolatinį magnetą prie žiedo, šis nuo jo tolsta, o jį tolinant – artėja. Bandymo rezultatai nepriklauso nuo magneto poliaus.



221 pav.

Ištisinis žiedas juda paskui magnetą arba nuo jo tolsta dėl to, kad, kintant jį kertančiam magnetiniam srautui, žiede indukuojasi elektros srovė, kurią veikia magnetinis laukas. Suprantama, kad, magnetą artinant prie žiedo, indukuotoji srovė juo turi tekėti tokia kryptimi, kad sukurtų magnetinį lauką, priešingą išoriniam magnetiniam laukui, o tolinant magnetą, – tokia kryptimi, kad jos magnetinio lauko indukcijos vektoriaus kryptis sutaptų su išorinio lauko indukcijos vektoriaus kryptimi.

Bendroji Lenco taisyklės formuluotė tokia: *uždarame kontūre indukuotoji srovė teka tokia kryptimi, kad jos sukurtas magnetinis srautas, kertantis kontūro ribojamą plotą, kompensuotų magnetinio srauto kitimą, kuris sukelia šią srovę.*

Bandymais tyrinėjant evj priklausomybę nuo magnetinio srauto kitimo, buvo nustatytas elektromagnetinės indukcijos dėsnis: **uždarame kontūre indukuotoji elektrovara proporcinga magnetinio srauto, kertančio kontūro ribojamą plotą, kitimo greičiui.**

Tarptautinėje SI matavimo vienetų sistemoje magnetinio srauto vienetas pasirenkamas toks, kad proporcingumo koeficientas tarp indukuotosios evj ir magnetinio srauto pokyčio būtų lygus vienetui. Tada elektromagnetinės indukcijos dėsnis formuluojamas taip: **uždarame kontūre indukuotoji elektrovara lygi magnetinio srauto, kertančio kontūro ribojamą plotą, kitimo greičio moduliui** ir, atsižvelgiant į Lenco taisyklę, elektromagnetinės indukcijos dėsnis užrašomas taip:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (230)$$

Jeigu nuosekliai sujungtuose kontūruose magnetinis srautas kinta vienodai, tai indukuotoji elektrovara juose lygi indukuotųjų elektrovarų kiekviename kontūre sumai. Todėl, kintant magnetiniam srautui, ritėje, sudarytoje iš n vienodų laidininko vijų, indukuojasi evj, n kartų didesnė už indukuotąją elektrovarą kiekviename kontūre:

$$\mathcal{E}_i = -n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (231)$$

Žinant magnetinio srauto kitimo greitį, pagal elektromagnetinės indukcijos dėsnį (230) galima rasti indukuotąją elektrovarą kontūre, o žinant kontūro elektrinę varžą, – apskaičiuoti elektros srovės stiprį jame. Vis dėlto fizikinė elektromagnetinės indukcijos reiškinio prasmė dar neatskleista. Šį reiškinį išnagrinėsime detaliau.

Kintant magnetiniam srautui, kertančiam kontūrą, jame atsiranda elektros srovė. Tai rodo, kad laisvuosius elektros krūvininkus kontūre veikia jėgos. Kontūro laidas nejuda, nejudančiais galima laikyti ir jame esančius laisvuosius elektros krūvininkus.

Juos gali veikti tiktai elektrinis laukas. Vadinasi, **bet kuriuo būdu kintant magnetiniam laukui, erdvėje atsiranda elektrinis laukas.** Jis veikia laisvuosius elektros krūvininkus kontūre, ir šie pradeda judėti, sukurdami indukuotąją elektros srovę. **Elektrinis laukas, kuris atsiranda kintant magnetiniam laukui, vadinamas sūkuriniù elektriniù laukù.**

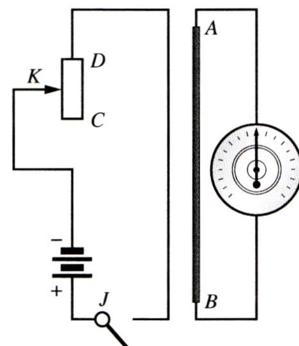
Sūkurinio elektrinio lauko jėgų darbas perkeliant elektros krūvius ir yra pašalinių jėgų darbas, indukuotosios elektrovaros šaltinis.

Sūkurinis elektrinis laukas skiriasi nuo elektrostatinio lauko tuo, kad yra nesusijęs su elektros krūvininkais, o jo stiprumo linijos uždaros. Darbas, kurį atlieka sūkurinio elektrinio lauko jėgos, perkeldamos elektros krūvį uždara linija, gali būti nelygus nuliui.

Klausimai ir užduotys

1. Ar atsiranda indukuotoji evj kontūre, kai vienalyčiame lauke jis: a) sukasi apie ašį, esančią kontūro plokštumoje ir statmeną magnetinei indukcijai $\vec{B}$; b) sukasi apie ašį, esančią kontūro plokštumoje ir nukreiptą išilgai išorinio lauko indukcijos $\vec{B}$; c) juda tiesiai ir tolygiai pro tiesaus magneto polių; d) gulsčias krinta ant žemės.

2. Taikydami dešiniosios rankos ir Lenco taisykles, nustatykite, kuria kryptimi teka indukuotoji srovė laidininku *AB*, kai: a) jungiklis *J* įjungiamas; b) jungiklis *J* išjungiamas; c) reostato slankiklis *K* juda taško *C* link; d) reostato slankiklis *K* juda taško *D* link.



3. Vielos žiedas, kurio plotas *S*, yra vienalyčiame magnetiniame lauke. Lauko indukcija $\vec{B}$ statmena žiedo plokštumai. Jei per laiką Δt žiedas apsisuka kampu α, tai žiede indukuojasi elektrovara $\mathcal{E}_1$. Apskaičiuokite:

a) $\mathcal{E}_1$, kai $S = 80$ cm^2, $B = 1$ T, $\alpha = 90°$, $\Delta t = 0{,}1$ s;
b) Δt, kai $S = 100$ cm^2, $B = 2$ T, $\alpha = 60°$, $\mathcal{E}_1 = 0{,}1$ V;
c) S, kai $B = 1{,}5$ T, $\alpha = 30°$, $\mathcal{E}_1 = 0{,}2$ V, $\Delta t = 0{,}2$ s;
d) B, kai $S = 200$ cm^2, $\alpha = 45°$, $\Delta t = 0{,}15$ s, $\mathcal{E}_1 = 0{,}2$ V.

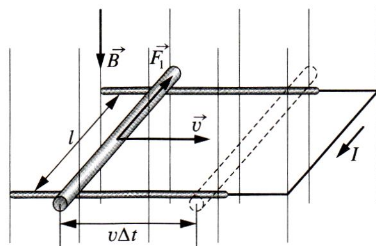
4. Laidininko kontūrą veriantis magnetinis srautas per 0,2 s pakito 1,2 Wb. Apskaičiuokite srauto kitimo greitį ir elektrovarą, kuri indukuojasi kontūre.

5. Kelių vijų ritę reikia uždėti ant 150 cm^2 skerspjūvio ploto plieninės šerdies, kad per 15 ms, magnetiniam srautui kintant nuo 0,2 T iki 2,2 T, indukuotųsi 200 V elektrovara?

93. Indukuotoji elektrovara judančiuose laidininkuose

Elektromagnetinės indukcijos reiškinį galima stebėti ir tuomet, kai magnetinis laukas pastovus, o kontūrą kertantis magnetinis srautas kinta dėl kontūro laidininkų judėjimo magnetiniame lauke. Šiuo atveju indukuotosios elektrovaros atsiradimo priežastis yra ne sūkurinis elektrinis laukas, o Lorenco jėga.

Išnagrinėkime stačiakampį kontūrą, esantį vienalyčiame magnetiniame lauke, kurio indukcijos vektorius $\vec{B}$ statmenas kontūro plokštumai. Sakykime, laidas šliaužia pastoviu greičiu $\vec{v}$ dviem kontūro laidais (222 pav.). Per laiką Δt kontūro plotas pakinta dydžiu $\Delta S = lv\Delta t$, o jį kertantis magnetinis srautas – dydžiu $\Delta\Phi = -Blv\Delta t$. Todėl kontūre indukuojasi evj



222 pav.

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = Blv. \tag{232}$$

Magnetiniame lauke judančiame laidininke esantį elektros krūvį q veikia Lorenco jėga $F_L = qvB$. Dabar apskaičiuokime šios jėgos atliekamą darbą perkeliant elektros krūvį kontūru atstumu l:

$$A = F_L l = qvBl. \tag{233}$$

Nejudančiose kontūro dalyse Lorenco jėga lygi nuliui, todėl visas darbas, kurį atlieka Lorenco jėga, perkeldama krūvį q kontūru, lygus jos darbui judančioje kontūro dalyje.

Lorenco jėgos darbą laikydami pašalinių jėgų darbu kontūre, gausime pašalinių jėgų evj išraišką:

$$\mathcal{E}_i = \frac{A}{q} = Blv. \tag{234}$$

232 ir 234 lygtys sutampa, vadinasi, indukuotosios elektrovaros atsiradimo kontūre priežastis yra Lorenco jėgos poveikis krūviams judančiame laidininke.

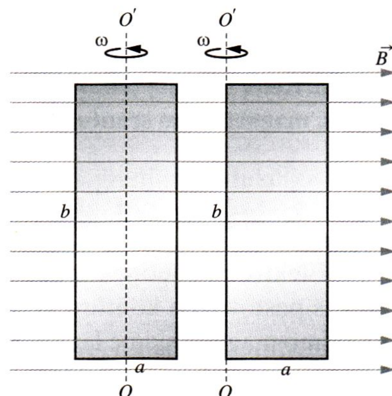
Klausimai ir užduotys

1. Giedrą dieną du vienodi lėktuvai skrenda horizontaliai tokiu pačiu greičiu. Vienas skrenda arti pusiaujo, kitas – arti poliarinio rato. Kurio lėktuvo sparnų galuose susidarys didesnis potencialų skirtumas?

2. Automobilio rėmas yra uždaras kontūras. Ar indukuojasi jame srovė, kai automobilis juda Žemės magnetiniame lauke?

3. Lėktuvas, kurio sparnų ilgis 36 m, skrenda 900 km/h greičiu. Žemės magnetinio lauko statmena dedamoji 50 μT. Kokio didumo potencialų skirtumas susidaro tarp lėktuvo sparnų? Ar galima išmatuoti lėktuvo greitį, sparnų galus sujungus galvanometru?

4. Vienalyčiame magnetiniame lauke 6π s^{-1} kampiniu greičiu apie ašį OO' sukasi plokščias metalinis stačiakampis rėmelis. Rėmelio varža 0,4 Ω, kraštinių ilgis a = 20 cm, b = 50 cm. Kokio stiprio srovė indukuojasi rėmelyje, kai ašis OO': a) eina rėmelio viduriu; b) sutampa su kraštine b?



5. 2 m ilgio ir 0,02 Ω varžos laidininkas juda 6 m/s greičiu magnetiniame lauke statmenai jo jėgų linijoms. Kokio stiprio elektros srovė tekės laidininku jį trumpai sujungus, jeigu lauko magnetinė indukcija lygi 10 mT?

94. Saviindukcija. Magnetinio lauko energija

Laidininku tekanti elektros srovė sukuria aplink jį magnetinį lauką. Žinome, kad magnetinis srautas Φ, kertantis šio laidininko kontūrą, proporcingas magnetinio lauko indukcijos $\vec{B}$ moduliui kontūre, o magnetinio lauko indukcija – srovės stipriui laidininke (žr. §87). Vadinasi, magnetinis srautas, kertantis kontūrą, proporcingas srovės stipriui tame kontūre:

$$\Phi = LI. \qquad (235)$$

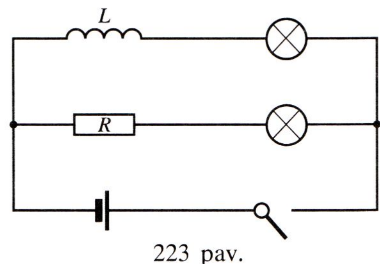
Proporcingumo koeficientas L vadinamas *induktyvumù*. *Induktyvumas priklauso nuo laidininko matmenų ir formos bei nuo aplinkos, kurioje yra laidininkas, magnetinių savybių.*

Tarptautinėje SI matavimo vienetų sistemoje induktyvumo vienetu laikomas *heñris* (H). Jis apibūdinamas remiantis perrašyta 235 formule: $L = \frac{\Phi}{I}$; $[L] = \frac{1\ \text{Wb}}{1\ \text{A}} = 1\ \text{H}$.

1 H lygus induktyvumui tokio kontūro, kuriuo tekanti 1 A nuolatinė elektros srovė sukuria 1 Wb magnetinį srautą.

Kintant srovės stipriui ritėje, kinta šios srovės sukurtas magnetinis srautas. Todėl ritėje turi indukuotis evj. **Indukuotosios elektrovaros atsiradimas elektros grandinėje, kintant joje srovės stipriui, vadinamas saviindùkcija.** Pagal Lenco taisyklę *saviindukcijos elektrovara priešinasi srovės stiprėjimui arba silpnėjimui grandinės įjungimo arba išjungimo metu.*

Saviindukcijos reiškinį galima stebėti elektros grandinėje, kurią sudaro didelio induktyvumo ritė, rezistorius, dvi vienodos kaitinimo lemputės ir srovės šaltinis (223 pav.). Rezistoriaus elektrinė varža turi būti lygi ritės laido varžai. Bandymas rodo, kad, sujungus grandinę, elektros lemputė, sujungta nuosekliai su rite, užsidega šiek tiek vėliau negu lemputė, sujungta nuosekliai su rezistoriumi.



223 pav.

Srovės stiprėjimui ritės grandinėje priešinasi saviindukcijos evj, kuri atsiranda didėjant magnetiniam srautui ritėje. Išjungus srovės šaltinį, žybteli abi lemputės. Šiuo atveju srovę grandinėje palaiko saviindukcijos elektrovara, kuri atsiranda mažėjant magnetiniam srautui ritėje.

Pagal elektromagnetinės indukcijos dėsnį ritėje, kurios induktyvumas L, indukuota saviindukcijos elektrovara lygi

$$\mathcal{E}_s = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{arba} \quad \mathcal{E}_s = -LI'. \qquad (236)$$

Saviindukcijos elektrovara tiesiogiai proporcinga ritės induktyvumui ir srovės stiprio kitimo greičiui ritėje.

Remiantis 236 formule, galima kitaip apibrėžti induktyvumo vienetą: **1 H lygus induktyvumui tokio laidininko, kuriame atsiranda 1 V saviindukcijos elektrovara, kai laidininku tekančios srovės stipris per 1 s tolygiai pakinta 1 A.**

Induktyvumo ritę atjungus nuo srovės šaltinio, lemputė, sujungta lygiagrečiai su rite, žybteli. Srovė grandinėje atsiranda veikiant saviindukcijos elektrovarai. Elektros grandinėje išsiskiriančios energijos šaltinis šiuo atveju yra ritės magnetinis laukas.

Kad būtų lengviau apskaičiuoti induktyvumo ritės magnetinio lauko energiją, išnagrinėkime tokį atvejį. Atjungus ritę nuo srovės šaltinio, srovė grandinėje laikui bėgant silpnėja pagal tiesinį dėsnį. Tada saviindukcijos elektrovara yra pastovi ir lygi $\mathcal{E}_s = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} = L\frac{I}{t}$; čia t – laiko tarpas, per kurį srovės stipris grandinėje sumažėja nuo pradinės vertės I iki nulio.

Srovės stipriui tiesiškai mažėjant nuo I iki 0, per laiką t grandine prateka elektros krūvis $q = I_{\text{vid}}t = \frac{I}{2}t$, todėl elektros srovės darbas bus išreiškiamas formule $A = q\mathcal{E}_s = \frac{It}{2}\cdot\frac{LI}{t} = \frac{LI^2}{2}$.

Šį darbą srovė atlieka naudodama ritės magnetinio lauko energiją.

Induktyvumo ritės magnetinio lauko energija W_m lygi jos induktyvumo ir srovės stiprio joje kvadrato sandaugos pusei:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \qquad (237)$$

Klausimai ir užduotys

1. 0,6 H induktyvumo ir 10 cm² skerspjūvio ploto rite tekant 2 A stiprio srovei, susidaro 1 T indukcijos magnetinis laukas. Kiek vijų yra ritėje?

2. 0,4 H induktyvumo ritėje tolygiai keičiant elektros srovės stiprį nuo 0,05 A iki 0,25 A, susidaro 0,12 V saviindukcijos evj. Apskaičiuokite srovės kitimo trukmę.

3. Ritės su šerdimi induktyvumas 25 H. Ritė prijungta prie srovės šaltinio, kurio evj 36 V. Atjungus šaltinį, srovės stipris ritėje mažėja 20 A/s greičiu. Apskaičiuokite bendrą įtampą, kuri susidaro ritėje atjungimo momentu.

4. 500 vijų ritę, kuria teka 4 A stiprio elektros srovė, kerta 20 mWb magnetinis srautas. Apskaičiuokite ritės magnetinio lauko energiją.

5. Prie mokyklinio universaliojo transformatoriaus ritės su šerdimi prijungta 30 V nuolatinė įtampa. Ritės varža 6 Ω, induktyvumas 1 H. Kiek energijos išskirs ritė nutraukus grandinę? Kokio didumo evj indukuosis ritėje, jei ši energija išsiskirs per 10 ms?

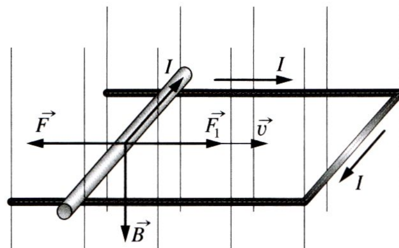
6. Transformatoriaus, kurio induktyvumas 0,6 H, apvija užmauta ant plieninės šerdies. Kokio stiprio elektros srovei tekant apvija magnetinio lauko energija lygi 90 J?

95. Nuolatinės srovės mašina

Elektros srovės atsiradimas laidininke, judant jam magnetiniame lauke, yra plačiai taikomas elektros generatoriuose.

Tarkime, kad laidininkas, kurio ilgis l, juda magnetiniame lauke statmenai indukcijos vektoriui $\vec{B}$. Šiame laidininke indukuojasi elektrovara, dėl to pradeda tekėti elektros srovė I. Laidininką, kuriuo teka elektros srovė, veikia Ampero jėga $\vec{F}$.

Pritaikius kairiosios rankos taisyklę, galima įsitikinti, kad Ampero jėgos vektoriaus $\vec{F}$ kryptis priešinga laidininko judėjimo greičio vektoriaus $\vec{v}$ krypčiai (224 pav.). Vadinasi, kad laidininkas judėtų tolygiai, jį turi veikti išorinė jėga $\vec{F}_1$, kurios modulis lygus Ampero jėgos $\vec{F}$ moduliui, o kryptis priešinga: $\vec{F}_1 = -\vec{F}$.



224 pav.

Perkeldama laidininką atstumu $\Delta d = v\Delta t$, ši jėga atlieka darbą

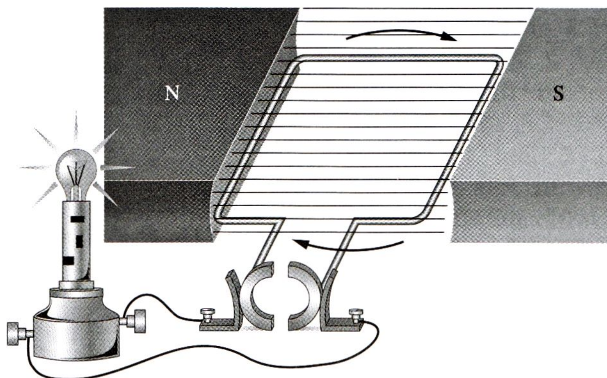
$$A = F_1\Delta d = IBl\Delta d = \frac{q}{\Delta t}B\Delta S = q\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = q\mathcal{E}_i. \qquad (238)$$

Matome, kad **išorinių jėgų, kurios verčia laidininką judėti magnetiniame lauke, atliktas darbas yra lygus indukcinės elektrovaros darbui elektros grandinėje.**

Nuolatinės srovės mašinos, pavyzdžiui, generatoriaus, veikimo principas pagrįstas indukcinės evj atsiradimu laidininko rėmeliuose, besisukančiuose magnetiniame lauke (225 pav.).

Nuolatinės srovės mašinos pagrindinės dalys yra *žãdinimo sistemà*, kuri sukuria magnetinį lauką, *iñkaras*, kurio ritėje indukuojasi elektrovara, *kolèktorius* ir *elektrìniai šepetẽliai*. Kolektoriumi vadinamos viena nuo kitos izoliuotos plokštelės, prijungtos prie ričių. Kolektoriaus plokštelėmis šliuožia elektriniai šepetėliai, jungiantys apvijų galus su išorine elektros grandine.

Nuolatinės srovės mašinos žadinimo sistema nejuda ir yra mašinos statorius, o inkaras sukasi ir yra mašinos rotorius.



225 pav.

Inkaras turi plieninę ritinio formos šerdį, jo apvijų galai prijungti prie kolektoriaus plokštelių.

Inkarui sukantis žadinimo sistemos magnetiniame lauke, jo apvijų laiduose atsiranda indukuotoji elektrovara. Per kolektoriaus slankiuosius kontaktus ir elektrinius šepetėlius su elektros energijos vartotojais sujungiami galai tos inkaro apvijos, kurioje tuo laiko momentu indukuojasi didžiausia evj.

Apvijos laidai juda statmenai magnetinio lauko indukcijos linijoms. Tarp laidininko galų indukuojasi evj, kuri yra tiesiog proporcinga laidininko judėjimo magnetiniame lauke greičiui $\vec{v}$, laidininko ilgiui l ir magnetinio lauko indukcijai $\vec{B}$. Todėl atviros apvijos, turinčios N vijų, galų įtampa $U = 2NvBl$.

Laidininko linijinį greitį v, rotoriaus sukimosi dažnį f ir jo spindulį R sieja formulė $v = 2\pi Rf$. Todėl atviros apvijos įtampą išreikšime taip: $U = 4\pi RNfBl$. Kadangi rėmelių plotas $S = 2Rl$, o magnetinis srautas $\Phi = BS$, tai generatoriaus išėjimo įtampa

$$U = 2\pi Nf\Phi. \qquad (239)$$

Labai gera nuolatinės srovės mašinos ypatybė – jos apgręžiamumas, t. y. galimybė tą pačią mašiną panaudoti tiek mechaninei energijai paversti elektros energija, tiek elektros energijai paversti mechanine energija.

Nuolatinės srovės mašiną naudojant kaip elektros variklį, reikia induktoriaus apvija leisti tekėti nuolatinei elektros srovei. Šepetėlius prijungus prie nuolatinės įtampos, inkaro apvija pradeda tekėti elektros srovė ir magnetinis laukas apvijos laidus veikia Ampero jėga $\vec{F}$.

Priešingose inkaro pusėse esančius apvijos laidus veikia priešingų krypčių Ampero jėgos. Jų veikiamas inkaras pradeda suktis. Toks elektros variklis gali sukti elektrovežio, troleibuso, tramvajaus ratus.

KLAUSIMŲ IR UŽDUOČIŲ ATSAKYMAI

1 skyrius

6. **7.** 400 m; ≈ 316 m. **8.** 4,6 km.
7. **3.** Už 28 km į vakarus; už 21 km į rytus. **4.** 34,4 m; po ≈ 4,3 s.
8. **5.** 1 km/h; 19 km/h. **6.** 140 m. **7.** 30 s.
9. **5.** 62,4 km/h. **8.** 4 s. **9.** 96 m. **10.** 6 s; 75 m.
10. **4.** ≈19 m/s. **5.** ≈ 2,7 mm/s^2. **7.** 30 km/s. **11.** 1,83·10^{-8} rad/s; 3 cm/s; 1,5 cm/s; 16,12. **12.** 40.

2 skyrius

12. **6.** 4 kN. **7.** 125 m. **10.** 0,2 kg. **11.** 15 kN. **12.** 2560 m.
13. **2.** 60 N. **3.** Taip; ne; didžiausia jėga veikia skridinio ašį pirmuoju atveju. **4.** $F_1 = F_2 =$ 600 N. **5.** ≈ 35 kN.
14. **4.** 30 m/s^2; 20 m/s^2. **5.** 0,5 m/s^2. **7.** 15 N.

3 skyrius

15. **6.** 9,80 N; ≈ 9,77 N. **7.** 90 min. **8.** 36 000 km. **13.** 2,7 kN. **14.** 74 kN. **15.** 8,2 kN.
16. **7.** 50 N/m. **8.** 780 N. **9.** 3800 N.
17. **10.** 10 m/s. **11.** ≈ 3,4 s; ≈ 34 m.
18. **8.** ≈ 32 cm atstumu nuo sunkesnio kūno. **9.** Į 1,8 m aukštį. **10.** 400 N; 600 N.

4 skyrius

19. **6.** ≈ 6,86 kJ. **7.** – 0,32 J. **8.** Vienodą. **9.** 19,6 kJ. **10.** Taip; taip. **11.** 1,8·10^8 J. **12.** 27 J; 48 J; 75 J. **13.** 2 m/s^2.
21. **6.** ≈ 63 m/s. **7.** 9 kartus. **8.** 6,3 m/s. **9.** Gali. **10.** 0,2 m.
22. **5.** ≈ 1,33 m/s. **6.** 0,2 m/s. **7.** 1,52 kN. **8.** 10 N. **9.** 1,8 m/s; 52^0. **10.** 5,3 m/s; 2,7 m/s. **11.** 0,08 m/s.

5 skyrius

23. **4.** 0,2 s. **5.** 80 cm. **6.** Sumažės $\sqrt{2}$ karto. **7.** π/2; 2π/3; 4π/3; 5π/3. **8.** ≈ 17,3 m/s. **9.** ≈ 0,2 s.
24. **5.** –0,3 m/s^2; 0. **7.** 3,14 s; 9,8 m/s^2. **8.** $x = 0{,}05 \sin 4\pi t$. **9.** 0,12 m. **10.** 0,5 s. **11.** $x = 0{,}1 \cos 2t$; 0,2 N.
25. **6.** 2,8 J; ≈ 3,8 m/s. **7.** 0,18 mN; 4,5 μJ.
30. **7.** 0,5 s. **8.** ≈ 920 m.
31. **7.** 0,51 mm.

6 skyrius

37. **11.** 1,6 m/s. **12.** p_s = 20,6 · 10^4 Pa; p_d = 0,2 · 10^4 Pa; p_h = 20,8 · 10^4 Pa.
38. **6.** 4,3 · 10^{-9} m. **7.** 450 m/s.

7 skyrius

40. **2.** 4 · 10^{18}. **4.** 4 · 10^6 km. **5.** 5,33 · 10^{-26} kg; 7,3 · 10^{-26} kg; 3 · 10^{-26} kg; 2,8 · 10^{-26} kg. **6.** ≈1,88 · 10^{23}. **7.** Beveik vienodos. **8.** 2,2 kg.
41. **3.** 6 · 10^{-8} m. **5.** ≈ 685 m/s; ≈ 1,1 · 10^{-20} J; ≈ 6,1 · 10^5 J. **6.** 5,25 · 10^{-20} J. **7.** 5 · 10^5 Pa; 1,5 kg/m^3; 2,5 · 10^{-20} J; 3 · 10^{26}; 15 kg; 30 · 10^{-3} kg/mol; 0,02 m^3.
42. **2.** 1,2 kg/m^3; 12 kg; 24 · 10^{24}m^{-3}; 5 · 10^{-26} kg; 30 · 10^{-3} kg/mol. **4.** 2 kartus. **5.** 6 kartus. **9.** 6,21 · 10^{-21} J; 1,45 · 10^{26} m^{-3}. **10.** 387 °C. **11.** ≈ 2,2 · 10^{22}.
43. **4.** 4,7 · 10^4 Pa; 19,5 g. **5.** 240 K. **6.** 5,35 · 10^{-4} kg.
44. **2.** 3,2 · 10^5 Pa. **6.** 1,2 m^3. **7.** 15 l. **8.** 625,5 K. **9.** 3,92 · 10^6 Pa. **10.** ≈ 20,6 m.
45. **11.** 452 kJ.

8 skyrius

48. **6.** ≈ 0,92 kg. **7.** Rasos nebus. **8.** 27 kg. **9.** 12 t. **11.** 286 K. **12.** 2,1 kg; 4,68 kg.
49. **3.** 1,6 · 10^{-4} J. **4.** 6,3 · 10^{-4} J. **5.** 0,022 N/m. **6.** Per 24 min. **7.** 289.
50. **4.** ≈ 0,11 N. **5.** 3,5 mJ. **6.** 130 kPa. **7.** 1,4 · 10^{-4} m.
51. **10.** 27%.
52. **9.** 0,12 mm^2; 2 · 10^8 Pa; 4,10^{-2} m; 0,22 · 10^{-2}. **10.** ≈ 2,3 · 10^{-2}m. **11.** Liktinė difrakcija atsiras, kai $F \geq$ 2,2 · 10^2 N; 9,8 · 10^{-4}. **12.** 166 rad/s.
53. **3.** ≈ 126 °C. **4.** ≈ 1,69 · 10^{-5} m^3. **5.** 790 kg/m^3. **7.** 100 K.

9 skyrius

54. **6.** 10^5 Pa. **7.** ≈1 J.

55. **3.** $8,31 \cdot 10^5$ J. **4.** 34,4 J.
56. **8.** 930 kg. **9.** 32%.
57. **7.** 1,7 kJ; 4,1 kJ.
58. **7.** 263 kW. **8.** 8%. **9.** 40%.

10 skyrius

61. **4.** $\approx 9,2 \cdot 10^{-8}$ N. **5.** $8,6 \cdot 10^{-14}$ C. **6.** $q_1 = q_2 = 4,2$ nC.
62. **4.** $E_B = 9,72 \cdot 10^4$ V/m; $E_C = -6,2 \cdot 10^4$ V/m; $E_D = 1,08 \cdot 10^4$ V/m. **5.** Vanduo $0,72 \cdot 10^{-9}$ C²/Nm². **6.** $1 \cdot 10^{-7}$ s.
63. **5.** 2,9 m. **6.** $E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0}$. **7.** 11 N/C; $0,25 \cdot 10^{-5}$ s. **8.** 40,5 V/m. **9.** 0,0237 m; $4,7 \cdot 10^{-8}$ s. **10.** $E = \frac{4}{3}\pi R^3 g \frac{|\rho_1 - \rho_2|}{q}$. **11.** ≈ 970 V/m; kai $q_1 > 0$, $\vec{E}_A$ vektoriaus modulis nekinta, kinta tik kryptis. **12.** $q_x = Q\frac{q_1}{Q - q_1}$.
64. **6.** 400 V.
65. **3.** Trauka padidės. **4.** $\approx 5,08$ m. **5.** $\approx 2 \cdot 10^{21}$. **6.** ≈ 15 m/s². **7.** $1 \cdot 10^{-7}$ kg.
66. **5.** $11,2 \cdot 10^{-9}$ J; 3 eV. **7.** 5 V. **8.** $9,2 \cdot 10^{-3}$ J. **9.** $4 \cdot 10^{-7}$ J. **10.** 52 V.
67. **8.** $9,2 \cdot 10^{-3}$ J. **9.** 0,15 m. **10.** $-2,3 \cdot 10^3$ V. **11.** 0 V/m; 1800 V. **12.** $1,5 \cdot 10^8$ V.
68. **4.** $4 \cdot 10^4$ V; $4 \cdot 10^{-2}$ m. **5.** $8 \cdot 10^{-4}$ C. **6.** $24 \cdot 10^{-8}$ F; $6 \cdot 10^{-5}$ C. **7.** Kondensatoriaus talpa padidėjo šešis kartus, o krūvis nepasikeitė. **8.** $5 \cdot 10^{-9}$ C. **9.** $1,03 \cdot 10^7$ m/s. **10.** $\approx 1,7 \cdot 10^{-5}$ C. **11.** $\approx 1,8 \cdot 10^7$ V/m. **12.** $\approx 5,5$ mm.
69. **1.** 100 V. **2.** 2 μC; 4 μC; 6 μC. **3.** 7,5 kV; 4,5 kV; 2,25 μC; 2,25 μC. **5.** a) Įtampa sumažės du kartus, lauko stipris ir krūvis nepasikeis; b) įtampa nepakis, lauko stipris ir krūvis padidės du kartus. **6.** a) 1,2 μF; b) 240 V; 160 V. **7.** 2 V. **8.** 1 μF.
70. **1.** $\approx 0,6$ J. **2.** 28,8 mW. **3.** 0; 0,028 J/m². **4.** 97 mJ/m³. **5.** $1,76 \cdot 10^{11}$ C/kg. **6.** Talpa padidėjo 4 kartus; energija ir įtampa sumažėjo 4 kartus, o krūvis nepakito.

11 skyrius

72. **1.** 1 m. **2.** 2500 C. **3.** $2 \cdot 10^5$. **4.** 4,5 C. **5.** 0,1 A. **6.** $\approx 1 \cdot 10^{-2}$ mm/s. **7.** $3,2 \cdot 10^5$ A/m².
73. **2.** 0,34 Ω; $\approx 1,6 \cdot 10^{-5}$ m². **3.** 0,1 Ω. **4.** 28. **5.** 0,78 mm/s. **6.** 750 kg.
74. **5.** 15 V. **7.** 2 A. **8.** 10^6 1/(Ωm). **9.** ≈ 20 mV/m. **10.** 90 μA.
75. **5.** iki 52 °C. **6.** 0,004 K⁻¹. **7.** ≈ 13 kartų. **8.** ≈ 470 Ω. **9.** $2,44 \cdot 10^6$ A/m². **10.** 470,2 Ω.
76. **6.** 120 Ω; lygiagrečiai. **8.** 4 Ω. **9.** 7,5 Ω; 10 Ω.
77. **2.** Galima, jei prijungsime šuntą, kurio varža 0,1 Ω. **3.** 50 Ω. **4.** ≈ 28 cm. **5.** Reikia panaudoti 3,2 kΩ priešvaržę. **6.** 10 kartų. **7.** Lygiagrečiai ampermetrui reikia prijungti 0,1 Ω rezistorių. **8.** Nuosekliai voltmetrui reikia prijungti 3,2 kΩ varžos rezistorių.
78. **8.** ≈ 9 MJ. **10.** 492 A.
79. **3.** 0,55 A. **4.** 100 A; 50 V; 400 A. **5.** 3,2 V; 1,6 A; 0,4 A. **6.** $\frac{U}{\varepsilon} = \frac{n}{n+1}$. **7.** 29 A.
80. **2.** 22,6 Ω; 5,3 A. **3.** 533 kJ; 4,6 Ω; 11 m. **4.** 0,3 mm. **5.** 4,3 K. **6.** $0,006^0$.

12 skyrius

81. **8.** 160 A/m². **9.** $\approx 0,7$ V. **10.** $9,4 \cdot 10^{18}$. **11.** 37 W. **12.** 8 kg. **13.** $5 \cdot 10^{-5}$ m. **14.** 330 K.
82. **4.** $3,56 \cdot 10^{-15}$ N. **5.** $3,5 \cdot 10^4$ V/m. **6.** $2,3 \cdot 10^6$ m/s. **7.** Normaliomis sąlygomis dujos nelaidžios elektros srovei.
83. **5.** 10^{-2} m. **6.** $3,92 \cdot 10^{-18}$ J. **7.** $3,56 \cdot 10^{-15}$ N. **8.** $6,7 \cdot 10^{-20}$ J.

13 skyrius

87. **7.** $2,9 \cdot 10^{-3}$ T. **8.** $6,2 \cdot 10^{-3}$ T. **9.** 0. **10.** 0,01 T. **11.** 12,6 A; srovių kryptys vienodos. **12.** 1,9 m. **13.** 0,74 A. **14.** $2,1 \cdot 10^{-4}$ T; $1,1 \cdot 10^{-4}$ T.
88. **2.** 19 N. **3.** $23 \cdot 10^{-2}$ J. **4.** 2,6 A.
89. **6.** $3 \cdot 10^{-12}$ N. **7.** $6 \cdot 10^{-2}$ m. **8.** 0,3 m.
92. **3.** **a)** 80 mV; **b)** 0,1 s; **c)** 0,2 m²; **d)** 5,1 T. **4.** 0,6 Wb/s; – 0,6 V. **5.** 100 vijų.
93. **3.** 0,45 V; negalima. **4.** Abiem atvejais $I = \frac{\omega abB}{R}$; $I = 0,09\ A$. **5.** 6 A.
94. **1.** 1200. **2.** 0,67 s. **3.** 586 V. **4.** 20 J. **5.** 12,5 J; 500 V. **6.** 17 A.

PRIEDAI

Pirmojo fizikos koncentro pagrindinės sąvokos

Fizikinis dydis	Formulė	Matavimo vienetas
Kelias	$s = vt$	1 m
Greitis	$v = \frac{s}{t}$	1 m/s
Pagreitis	$a = \frac{v - v_0}{t}$	$1\ m/s^2$
	$a = \frac{F}{m}$	
Medžiagos tankis	$\rho = \frac{m}{V}$	$1\ kg/m^3$
Jėga	$F = ma$	1 N
Sunkio jėga	$F = mg$	
Kūno svoris	$P = mg$	
Mechaninis darbas	$A = Fs$	1 J
Mechaninė galia	$N = \frac{A}{t}$	1 W = 1 J/s
	$N = Fv$	
Potencinė energija	$E_p = mgh$	1 J
Kinetinė energija	$E_k = \frac{mv^2}{2}$	1 J
Jėgos momentas	$M = Fl$	1 Nm
Naudingumo koeficientas	$\eta = \frac{A_n}{A_v} = \frac{A_n}{Q}$	
Slėgis	$p = \frac{F}{S}$	$1\ Pa = 1\ N/m^2$
Skysčių (dujų) slėgis	$p = \rho gh$	1 Pa
Archimedo jėga	$F_A = \rho_s gV$	1 N
Šilumos kiekis	$Q = cm(t_2 - t_1)$	1 J
Šilumos kiekis, išsiskiriantis kurui sudegus	$Q = qm$	1 J
Šilumos kiekis kūnui išlydyti (sukietėti)	$Q = \lambda m$	1 J
Šilumos kiekis kūnui išgarinti (kondensuotis)	$Q = Lm$	1 J
Elektros srovės stipris	$I = \frac{q}{t}$	1 A
Elektrinė įtampa	$U = \frac{A}{q}$	1 V
Laidininko elektrinė varža	$R = \rho \frac{l}{S}$	1 Ω
Elektros srovės darbas	$A = UIt$	1 J = 1 Ws
Elektros srovės galia	$P = UI$	1 W = 1 J/s

Tęsinys

Fizikinis dydis	Formulė	Matavimo vienetas
Periodas	$T = \frac{t}{n}$	1 s
Dažnis	$\nu = \frac{1}{T}$	1 Hz = 1 s^{-1}
Bangos sklidimo greitis	$v = \frac{\lambda}{T}$; $v = \lambda\nu$	1 m/s
Bangos ilgis	$\lambda = \frac{v}{\nu}$; $\lambda = vT$	1 m
Elektrinė talpa	$C = \frac{q}{U}$	1 F = $\frac{1C}{1V}$
Tomsono formulė	$T = 2\pi\sqrt{LC}$	1 s
Apšvieta	$E = \frac{\Phi}{S}$; $E = \frac{I}{R^2}$	1 lx = 1 lm/1m
Medžiagos lūžio rodiklis	$n = \frac{C}{V}$	
Lęšio formulė	$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$	
Optinė geba	$D = \frac{1}{F}$	1 D = 1 m^{-1}
Tiesinis didinimas	$\Gamma = \frac{f}{d}$	
Difrakcinės gardelės formulė	$d \sin \varphi = k\lambda$	
Fotono energija	$E = h\nu$; $E = h\frac{c}{\lambda}$	1 J
Einšteino fotoefekto lygis	$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$	

Laidininkų jungimo būdai

Fizikinis dydis	Nuoseklusis jungimas	Lygiagretusis jungimas
Srovės stipris	$I = I_1 = I_2$	$I = I_1 + I_2$
Įtampa	$U = U_1 + U_2$	$U = U_1 = U_2$
Varža	$R = R_1 + R_2$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

Pagrindinės konstantos

Elementarusis elektros krūvis (elektrono krūvio modulis)	e	$1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C
Elektrono rimties masė	m_e	$9{,}1095 \cdot 10^{-31}$kg = 0,000548 u
Protono rimties masė	m_p	$1{,}6726 \cdot 10^{-27}$kg = 1,00728 u
Neutrono rimties masė	m_n	$1{,}6749 \cdot 10^{-27}$kg = 1,00866 u

Šviesos greitis vakuume	c	$2{,}9979 \cdot 10^{8}$ m/s
Garso greitis ore (0 °C)	v_g	331 m/s
Gravitacijos konstanta	G	$6{,}672 \cdot 10^{-11}$ Nm²/kg²
Laisvojo kritimo pagreitis	g	9,81 m/s²
Normalus atmosferos slėgis	p_0	$1{,}01 \cdot 10^{5}$ Pa
Kulono dėsnio konstanta	$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$	$9 \cdot 10^{9}$ Nm²/C²
Elektrinė konstanta	ε_0	$8{,}854 \cdot 10^{-12}$ F/m
Magnetinė konstanta	μ_0	$1{,}257 \cdot 10^{-6}$ H/m
Planko konstanta	h	$6{,}626 \cdot 10^{-34}$Js = $4{,}136 \cdot 10^{-15}$ eVs
	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$1{,}0546 \cdot 10^{-34}$Js = $6{,}586 \cdot 10^{-16}$ eVs
Avogadro skaičius	N_A	$6{,}022 \cdot 10^{23}$ mol⁻¹
Bolcmano konstanta	k	$1{,}3807 \cdot 10^{-23}$J/K = $8{,}617 \cdot 10^{-4}$ eV/K
Rydbergo konstanta	R	$3{,}28 \cdot 10^{15}$ Hz
		$1{,}1 \cdot 10^{7}$ m⁻¹
Saulės konstanta	J_C	1370 J/(m²s)
Vyno konstanta	b	$29 \cdot 10^{-4}$ mK

Pagrindinių konstantų išvestiniai dydžiai

Rimties energija	$E_0 = mc^2$	
elektrono		$8{,}187 \cdot 10^{-14}$ J = 0,511 MeV
protono		$1{,}503 \cdot 10^{-10}$ J = 938,26 MeV
neutrono		$1{,}505 \cdot 10^{-10}$ J = 939,55 MeV
Masės ir energijos sąryšio koeficientas	$c^2 = \frac{E}{m}$	$8{,}9874 \cdot 10^{16}$ J/kg = 931,5 MeV/u
Elektrono krūvio ir masės santykis	$\frac{\lvert e \rvert}{m_e}$	$1{,}759 \cdot 10^{11}$ C/kg
Faradėjaus skaičius	$F = \lvert e \rvert N_A$	$9{,}648 \cdot 10^{4}$ C/mol
Universalioji dujų konstanta	$R = kN_A$	8,314 J/(mol · K)

Kai kurių matavimo vienetų sąryšis

Angstremas	1 ⁰A $= 10^{-10}$ m
Masės atominis vienetas	1 u = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg
Fizikinė atmosfera	1 atm = $1{,}01 \cdot 10^{5}$ Pa
Gyvsidabrio stulpelio milimetras	1 mmHg = 133 Pa
Elektronvoltas	1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J
Kalorija	1 cal = 4,19 J
Arklio galia	1 AG = 735,5 W
Astronominis vienetas	1 AU $\approx 150 \cdot 10^{9}$ m
Šviesmetis	1 ly $\approx 9{,}5 \cdot 10^{15}$ m

Žinios apie Saulę, Žemę ir Mėnulį

Saulės spindulys, m	$6{,}96 \cdot 10^{8}$
Saulės masė, kg	$1{,}99 \cdot 10^{30}$
Vidutinis Žemės spindulys, m	$6{,}371 \cdot 10^{6}$
Žemės masė, kg	$5{,}976 \cdot 10^{24}$
Žemės apsisukimo apie savo ašį periodas	23 h 56 min
Laisvojo kritimo pagreitis (Paryžiaus platumoje, jūros lygyje), m/s^2	9,80665
Normalus atmosferos slėgis, Pa	101325
Oro molio masė, kg/mol	$29 \cdot 10^{-3}$
Vidutinis nuotolis nuo Žemės iki Saulės, m	$1{,}496 \cdot 10^{11}$
Mėnulio spindulys, m	$1{,}737 \cdot 10^{6}$
Mėnulio masė, kg	$7{,}35 \cdot 10^{22}$
Mėnulio apsisukimo aplink Žemę periodas	27 paros
Laisvojo kritimo pagreitis Mėnulio paviršiuje, m/s^2	1,623
Vidutinis nuotolis nuo Žemės iki Mėnulio, m	$3{,}844 \cdot 10^{8}$

Kartotinių ir dalinių vienetų priešdėliai

eksa-	E	10^{18}	deci-	d	10^{-1}
peta-	P	10^{15}	centi-	c	10^{-2}
tera-	T	10^{12}	mili-	m	10^{-3}
giga-	G	10^{9}	mikro-	μ	10^{-6}
mega-	M	10^{6}	nano-	n	10^{-9}
kilo-	k	10^{3}	piko-	p	10^{-12}
hekto-	h	10^{2}	femto-	f	10^{-15}
deka-	da	10^{1}	ato-	a	10^{-18}

Graikų abėcėlė

Α α	alfa	Ι ι	jota	Ρ ρ	ro
Β β	beta	Κ ℵ	kapa	Σ σ	sigma
Γ γ	gama	Λ λ	lambda	Τ τ	tau
Δ δ	delta	Μ μ	mi	ϒ υ	ypsilon
Ε ε	epsilon	Ν ν	ni	Φ φ	fi
Ζ ξ	dzeta	Ξ ζ	ksi	Χ χ	chi
Η η	eta	Ο ο	omikron	Ψ ψ	psi
Θ ϑ	teta	Π π	pi	Ω ω	omega

Pagrindinių fizikinių dydžių lentelės

I. Kai kurių medžiagų tankis

Medžiaga	ρ, × 10^3 kg/m^3	Medžiaga	ρ, × 10^3 kg/m^3
Kietosios medžiagos, kai temperatūra 20 °C			
Akmens anglys	1,4	Nichromas	8,3
Alavas	7,3	Nikelinas	8,8
Aliuminis	2,7	Nikelis	8,9
Auksas	19,3	Parafinas	0,9
Cinkas	7,1	Platina	21,5
Chromas	7,2	Plyta	1,8
Deimantas	3,5	Porcelianas	2,3
Ebonitas	1,2	Sidabras	10,5
Geležis, plienas	7,8	Sniegas	0,3
Germanis	2,1	Stiklas (langų)	2,5
Gintaras	1,1	Švinas	11,4
Grafitas	5,32	Uranas	18,7
Kamštis	0,24	Valgomoji druska	2,1
Ketus	7,4	Vario sulfatas	2,2
Konstantanas	8,9	Varis	8,9
Ledas (0 °C)	0,9	Volframas	19,3
Malkos (pušinės)	0,5	Žalvaris	8,5
Manganinas	8,5	Žėrutis	2,8
Skysčiai, kai temperatūra 20 °C			
Aliejus	0,91	Gyvsidabris (0 °C)	13,6
Alyva (mineralinė, transformatorinė)	0,92	Glicerinas	1,26
		Nafta	0,8
Alyvų aliejus	0,92	Terpentinas	0,87
Etilo alkoholis	0,79	Vanduo	1,0
Etilo eteris	0,71	Vario sulfatas (sotusis)	1,15
Benzinas	0,7	Žibalas	0,8
Dujos (normaliomis sąlygomis)			
Argonas	$1,78 \cdot 10^{-3}$	Kseonas	$5,85 \cdot 10^{-3}$
Azotas	$1,25 \cdot 10^{-3}$	Metanas	$0,72 \cdot 10^{-3}$
Chloras	$3,21 \cdot 10^{-3}$	Neonas	$0,90 \cdot 10^{-3}$
Deguonis	$1,43 \cdot 10^{-3}$	Oras	$1,29 \cdot 10^{-3}$
Helis	$0,18 \cdot 10^{-3}$	Švytinčiosios dujos	$0,73 \cdot 10^{-3}$
Kriptonas	$3,74 \cdot 10^{-3}$	Vandenilis	$0,09 \cdot 10^{-3}$

II. Kai kurių medžiagų savitoji šiluma

Medžiaga	c, × 10^3 J/(kg · K)	Medžiaga	c, × 10^3 J/(kg · K)
Kietosios medžiagos			
Alavas	0,233	Parafinas	3,2
Aliuminis	0,92	Plienas, geležis	0,46
Auksas	0,125	Plyta	0,75
Cinkas	0,38	Sidabras	0,25
Ketus (pilkasis)	0,55	Stiklas	0,84
Ledas	2,09	Švinas	0,13
Medis	2,7	Varis	0,38
Naftalinas	1,3	Žalvaris	0,38
Skysčiai			
Alyva (mineralinė)	2,1	Glicerinas	2,43
Etilo alkoholis	2,43	Transformatorinė alyva	2,093
Geležis (skysta)	0,83	Vanduo	4,2
Gyvsidabris	0,125	Žibalas	2,14
Dujos (kai slėgis pastovus)			
Amoniakas	2,1	Helis	5,2
Anglies dioksidas	0,83	Oras	1,0
Azotas	1,0	Vandenilis	14,3
Deguonis	0,92	Vandens garai	2,2

III. Kai kurių rūšių kuro degimo šiluma

Medžiaga	q, MJ/kg	Medžiaga	q, MJ/kg
Kietasis kuras			
Akmens anglys		Koksas	30,3
markės A–I	20,5	Malkos (sausos)	8,3
markės A–II	30,3	Medžio anglys	29,7
Durpės	15	Parakas	3,0
Skystasis kuras			
Benzinas	46	Mazutas	40
Dyzelinis kuras	42	Nafta	43
Etilo alkoholis	27	Žibalas	43,1
Dujinis kuras (1 m^3 normaliomis sąlygomis)			
Gamtinės dujos	35,5	Koksavimo dujos	16,4
Generatorinės dujos	5,5	Švytinčiosios dujos	21

IV. Kai kurių medžiagų virimo taškas ir savitoji garavimo šiluma

Medžiaga	t_{vir}, °C (kai slėgis normalus)	L, MJ/kg
Acetonas	56,2	0,52
Amoniakas	–33,4	1,37
Benzinas	150	0,3
Etilo alkoholis	78	0,857
Etilo eteris	35	0,352
Geležis (skysta)	3050	0,06
Gyvsidabris	357	0,29
Oras	–192	0,21
Vanduo	100	2,26
Vanduo (sunkusis)	101,43	2,06

V. Kai kurių medžiagų lydymosi temperatūra ir savitoji lydymosi šiluma

Medžiaga	t_{lyd}, °C	λ, kJ/kg
Alavas	232	58
Aliuminis	659	380
Auksas	1064	66
Geležis	1530	270
Ketus (pilkasis)	1150	97
Ledas	0	335
Naftalinas	80	151
Plienas	1400	210
Sidabras	960	88
Švinas	327	25
Varis	1083	180
Volframas	3410	26

VI. Kai kurių skysčių paviršiaus įtempimo koeficientas, kai temperatūra 20 °C

Skystis	σ, × 10^{-2} N/m	Skystis	σ, × 10^{-2} N/m
Acetonas	2,4	Nafta	3,0
Benzinas	2,9	Plienas	4,6
Etilo alkoholis	2,2	Terpentinas	2,7
Gyvsidabris	47,0	Vanduo	7,2
Glicerinas	5,9	Vario sulfatas	7,4
Muilo tirpalas	4,0	Žibalas	2,4

VII. Kai kurių medžiagų tempimo stiprumo riba σ_{st} ir tamprumo modulis E

Medžiaga	σ_{st}, MPa	E, GPa
Alavas	20	50
Aliuminis	100	70
Betonas		20
Ketus		90
Medis		10
Plienas	500	200
Plyta		28
Sidabras	140	80
Švinas	15	15
Varis	400	120
Žalvaris		110

VIII. Sočiųjų vandens garų tankis ir slėgis įvairiose temperatūrose

t, °C	ρ, $\times 10^{-3}$ kg/m^3	p, mm Hg	p, $\times 10^3$ Pa	t, °C	ρ, $\times 10^{-3}$ kg/m^3	p, mm Hg	p, $\times 10^3$ Pa
–10	2,14	1,95	0,26	2	5,6	5,3	0,71
–5	3,24	3,01	0,40	3	6,0	5,7	0,76
–4	3,51	3,28	0,44	4	6,4	6,1	0,81
–3	3,81	3,57	0,48	5	6,8	6,6	0,88
–2	4,13	3,88	0,52	6	7,3	7,0	0,93
–1	4,47	4,22	0,56	7	7,8	7,5	1,0
0	4,8	4,6	0,61	8	8,3	8,0	1,07
1	5,2	4,9	0,65	9	8,8	8,6	1,15
10	9,4	9,2	1,23	25	23,0	23,8	3,17
11	10,0	9,8	1,31	26	24,4	25,2	3,36
12	10,7	10,5	1,40	27	25,8	26,7	3,56
13	11,4	11,2	1,49	28	27,2	28,4	3,79
14	12,1	12,0	1,60	29	28,7	30,0	4,00
15	12,8	12,8	1,71	30	30,3	31,8	4,24
16	13,6	13,6	1,81	40	51,2	55,3	7,37
17	14,5	14,5	1,93	50	83,0	92,5	12,33
18	15,4	15,5	2,07	60	130,0	149,4	19,92
19	16,3	16,5	2,20	80	293,0	355,1	47,33
20	17,3	17,5	2,33	100	598,0	760,0	101,31
21	18,3	18,7	2,49	120	1123,0	1489,0	198,48
22	19,4	19,8	2,64	160	3259,0	4636,0	617,98
23	20,6	21,1	2,81	200	7763,0	11661,0	15544,41
24	21,8	22,4	2,99				

IX. Psichrometrinė lentelė

Sausojo termometro rodmenys, °C	Sausojo ir drėgnojo termometro rodmenų skirtumas, °C											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Santykinė drėgmė, %											
0	100	82	63	45	28	11						
1	100	83	65	48	32	16						
2	100	84	68	51	35	20						
3	100	84	69	54	39	24	10					
4	100	85	70	56	42	28	14					
5	100	86	72	58	45	32	19	6				
6	100	86	73	60	47	35	23	10				
7	100	87	74	61	49	37	26	14				
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7			
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11			
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4		
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8		
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11		
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6	
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9	
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12	5
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15	8
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	27	10
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20	13
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22	15
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24	18
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26	20
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	22
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30	24
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31	26
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33	27

X. Kai kurių medžiagų ilgėjimo koeficientas

Medžiaga	α, $\times 10^{-5}$ K^{-1}	Medžiaga	α, $\times 10^{-5}$ K^{-1}
Alavas	2,1	Platina	0,9
Aliuminis	2,3	Plienas, geležis	1,2
Auksas	1,4	Stiklas	0,9
Cinkas	2,9	Švinas	2,9
Invaras	0,06	Varis	1,7
Ketus	1,0	Volframas	0,4
Nikelis	1,28	Žalvaris	1,9

XI. Kai kurių medžiagų tūrio plėtimosi koeficientas

Medžiaga	β, K^{-1}	Medžiaga	β, K^{-1}
Acetonas	$1{,}2 \times 10^{-3}$	Glicerinas	$5{,}0 \times 10^{-4}$
Alyva (transformatorinė)	$6{,}0 \times 10^{-4}$	Nafta	$1{,}0 \times 10^{-3}$
Benzinas	$1{,}0 \times 10^{-3}$	Sieros rūgštis	$5{,}7 \times 10^{-4}$
Etilo alkoholis	$1{,}1 \times 10^{-3}$	Vanduo (0 °C)	$1{,}8 \times 10^{-4}$
Gyvsidabris	$1{,}8 \times 10^{-4}$	Žibalas	$1{,}0 \times 10^{-3}$

XII. Kai kurių medžiagų dielektrinė skvarba

Medžiaga	ε	Medžiaga	ε
Alyva	2,5	Parafinuotas popierius	2,0
Benzinas	2,3	Stiklas	6 (5–10)
Ebonitas	2,7	Vaškas	5,8
Gintaras	2,8	Vanduo	
Glicerinas	39	20 °C	81
Organinis stiklas	3,3	0 °C	88
Parafinas	2,2	Žėrutis	6
		Žibalas	2,1

XIII. Kai kurių medžiagų savitoji varža, kai temperatūra 20 °C

Medžiaga	ρ, $\times 10^{-8}$ Ω · m	Medžiaga	ρ, $\times 10^{-8}$ Ω · m
Aliuminis	2,7	Plienas	12
Fechralis	110	Sidabras	1,6
Geležis	9,9	Sieros rūgštis (10 %)	2 600 000
Konstantanas	47	Švinas	21
Manganinas	39	Varis	1,68
Nichromas	105	Volframas	5,5
Nikelinas	42	Žalvaris	7,1

XIV. Kai kurių medžiagų temperatūrinis varžos koeficientas

Medžiaga	α, K^{-1}	Medžiaga	α, K^{-1}
Aliuminis	0,0042	Platina	0,004
Cinkas	0,004	Plienas	0,006
Fechralis	0,0002	Sidabras	0,004
Konstantanas	0,000005	Švinas	0,0037
Manganinas	0,000008	Varis	0,006
Nichromas	0,0002	Volframas	0,005
Nikelinas	0,0001	Žalvaris	0,001

XV. Kai kurių medžiagų elektrocheminis ekvivalentas

Medžiaga	k, $\times 10^{-6}$ kg/C	Medžiaga	k, $\times 10^{-6}$ kg/C
Aliuminis	0,093	Kalis	0,405
Chloras	0,367	Nikelis	0,304
Chromas	0,18	Sidabras	1,12
Cinkas	0,34	Vandenilis	0,0104
Deguonis	0,0829	Varis	0,33

XVI. Elektrono išlaisvinimo iš kai kurių medžiagų darbas

Medžiaga	A, eV	Medžiaga	A, eV
Bario oksidas	1,0	Nikelis	4,84
Cezis	1,9	Platina	5,3
Cinkas	3,74	Sidabras	4,3
Kadmis	4,08	Varis	4,5
Kalis	2,2	Volframas	4,5
Litis	2,4		

XVII. Kai kurių medžiagų lūžio rodiklis

Medžiaga	n	Medžiaga	n
Anglies disulfatas	1,63	Kedrų aliejus	1,52
Akmens druska	1,54	Kvarcas	1,54
Cukrus	1,56	Ledas	1,31
Deimantas	2,4	Oras	1,00029
Etilo alkoholis	1,36	Stiklas	1,6
Glicerinas	1,47	Vanduo	1,33

XVIII. Kai kurių elementų izotopų santykinė atominė masė

Elementas	Izotopas	Masė, u	Elementas	Izotopas	Masė, u
Vandenilis	$^{1}_{1}H$	1,00783	Deguonis	$^{16}_{8}O$	15,99491
	$^{2}_{1}H$	2,01410		$^{17}_{8}O$	16,99913
	$^{3}_{1}H$	3,01605	Fluoras	$^{19}_{9}F$	18,99843
Helis	$^{3}_{2}He$	3,01603	Neonas	$^{20}_{10}Ne$	19,99244
	$^{4}_{2}He$	4,00260	Aliuminis	$^{27}_{13}Al$	26,98153
Litis	$^{6}_{3}Li$	6,01513	Fosforas	$^{30}_{15}P$	29,97867
	$^{7}_{3}Li$	7,01601	Kalcis	$^{40}_{20}Ca$	39,97542
Berilis	$^{7}_{4}Be$	7,01916	Kobaltas	$^{56}_{27}Co$	55,95769
	$^{8}_{4}Be$	8,00531	Gyvsidabris	$^{200}_{80}Hg$	200,02800
	$^{9}_{4}Be$	9,01505	Radonas	$^{222}_{86}Rn$	222,01922
Boras	$^{10}_{5}B$	10,01294	Radis	$^{226}_{88}Ra$	226,02435
	$^{11}_{5}B$	11,00930	Uranas	$^{235}_{92}U$	235,04299
Anglis	$^{12}_{6}C$	12,00000		$^{238}_{92}U$	238,05006
	$^{13}_{6}C$	13,00335		$^{239}_{92}U$	239,05122
Azotas	$^{14}_{7}N$	14,00307	Plutonis	$^{239}_{94}Pu$	239,05122

XIX. Medžiagų trinties koeficientas

Guma į betoną	0,75
Medis į medį	0,25
Oda į ketų	0,56
Plienas į ledą	0,02
Plienas į plieną	0,20

XX. Kampų nuo 0 iki 90° sinusų ir tangentų verčių lentelė

Laipsniai	Sinusai	Tangentai	Laipsniai	Sinusai	Tangentai	Laipsniai	Sinusai	Tangentai
0	0,0000	0,0000	31	0,5150	0,6009	61	0,8746	1,804
1	0,0175	0,0175	32	0,5299	0,6249	62	0,8829	1,881
2	0,0349	0,0349	33	0,5446	0,6494	63	0,8910	1,963
3	0,0523	0,0524	34	0,5592	0,6745	64	0,8988	2,050
4	0,0698	0,0699	35	0,5736	0,7002	65	0,9063	2,145
5	0,0872	0,0875	36	0,5878	0,7265	66	0,9135	2,246
6	0,1045	0,1051	37	0,6018	0,7536	67	0,9205	2,356
7	0,1219	0,1228	38	0,6157	0,7813	68	0,9272	2,475
8	0,1392	0,1405	39	0,6293	0,8098	69	0,9336	2,605
9	0,1564	0,1584	40	0,6428	0,8391	70	0,9397	2,747
10	0,1736	0,1763	41	0,6561	0,8693	71	0,9455	2,904
11	0,1908	0,1944	42	0,6691	0,9004	72	0,9511	3,078
12	0,2079	0,2126	43	0,6820	0,9325	73	0,9563	3,271
13	0,2250	0,2309	44	0,6947	0,9657	74	0,9613	3,487
14	0,2419	0,2493	45	0,7071	1,0000	75	0,9659	3,732
15	0,2588	0,2679	46	0,7193	1,036	76	0,9703	4,011
16	0,2756	0,2867	47	0,7314	1,072	77	0,9744	4,331
17	0,2924	0,3057	48	0,7431	1,111	78	0,9781	4,705
18	0,3090	0,3249	49	0,7547	1,150	79	0,9816	5,145
19	0,3256	0,3443	50	0,7660	1,192	80	0,9848	5,671
20	0,3420	0,3640	51	0,7771	1,235	81	0,9877	6,314
21	03584	0,3839	52	0,7880	1,280	82	0,9903	7,115
22	0,3746	0,4040	53	0,7986	1,327	83	0,9925	8,144
23	0,3907	0,4245	54	0,8090	1,376	84	0,9945	9,514
24	0,4067	0,4452	55	0,8192	1,428	85	0,9962	11,43
25	0,4226	0,4663	56	0,8290	1,483	86	0,9976	14,30
26	0,4384	0,4877	57	0,8387	1,540	87	0,9986	19,08
27	0,4540	0,5095	58	0,8480	1,600	88	0,9994	28,64
28	0,4695	0,5317	59	0,8572	1,664	89	0,9998	57,29
29	0,4848	0,5543	60	0,8660	1,732	90	1,000	∞
30	0,5000	0,5774						

PERIODINĖ ELE

ATOMINĖ MASĖ — 35,453
OKSIDACIJOS LAIPSNIS — −1 +1 +3 +5 +7
SIMBOLIS — Cl
PAVADINIMAS — CHLORAS
ATOMINIS SKAIČIUS — 17

PEREINAMIEJI ELE

PERIODAI	GRUPĖS IA 1	IIA 2	IIIB 3	IVB 4	VB 5	VIB 6	VIIB 7	8	VIIIB 9
1	1,00794 H +1 −1 VANDENILIS 1								
2	6,941 Li +1 MANGANAS 3	9,01218 Be +2 BERILIS 4							
3	22,98977 Na +1 NATRIS 11	24,305 Mg +2 MAGNIS 12							
4	39,0983 K +1 KALIS 19	40,08 Ca +2 KALCIS 20	44,9559 Sc +3 SKANDIS 21	47,88 Ti +2 +3 +4 TITANAS 22	50,9415 V +2 +3 +4 +5 VANADIS 23	51,996 Cr +2 +3 +6 CHROMAS 24	54,9380 Mn +2 +3 +4 +7 MANGANAS 25	55,847 Fe +2 +3 GELEŽIS 26	58,9332 Co KOBALTAS 27
5	85,4678 Rb +1 RUBIDIS 37	87,62 Sr +2 STRONCIS 38	88,9059 Y +3 ITRIS 39	91,224 Zr +4 CIRKONIS 40	92,9064 Nb +3 +5 NIOBIS 41	95,94 Mo +3 +6 MOLIBDENAS 42	98 Tc +4 +6 +7 TECHNECIS 43	101,07 Ru +3 RUTENIS 44	102,906 Rh RODIS 45
6	132,905 Cs +1 CEZIS 55	137,33 Ba +2 BARIS 56	La-Lu 57–71	178,49 Hf +4 HAFNIS 72	180,948 Ta +5 TANTALAS 73	183,85 W +6 VOLFRAMAS 74	186,207 Re +4 +6 +7 RENIS 75	190,2 Os +3 +4 OSMIS 76	192,22 Ir IRIDIS 77
7	(223) Fr +1 FRANCIS 87	226,025 Ra +2 RADIS 88	Ac-Lr 89–103	(261) Rf REZERFORDIS 104	(262) Db DUBNIS 101	(266) Sg SIBORGIS 106	(264) Bh BORIS 107	(277) Hs HASIS 108	(268) Mt MEITNERI 109

LANTANOIDAI	138,906 La +3 LANTANAS 57	140,12 Ce +3 +4 CERIS 58	140,908 Pr +3 PRAZEODIMIS 59	144,24 Nd +3 NEODIMIS 60	(145) Pm +3 PROMETIS 61	150,36 Sm SAMARIS 62
AKTINOIDAI	227,028 Ac +3 AKTINIS 89	232,038 Th +4 TORIS 90	231,036 Pa +4 +5 PROAKTINIS 91	238,029 U +3 +4 +5 +6 URANAS 92	237,048 Np +3 +4 +5 +6 NEPTŪNIS 93	(244) Pu PLUTONIS 94

MENTŲ LENTELĖ

BŪSENA:

C – KIETOJI

Br – SKYSTOJI

O – DUJINĖ

N T A I

GRUPĖS

10	IB 11	IIB 12	IIIA 13	IVA 14	VA 15	VIA 16	VIIA 17	VIIIA 18	PERIODAI
								4,00260 He 0 HELIS 2	1
			10,81 B +3 BORAS 5	12,0111 C −4 +2 +4 ANGLIS 6	14,0067 N −3 −2 −1 +1 +2 +3 +4 +5 AZOTAS 7	15,9994 O −2 DEGUONIS 8	18,998403 F −1 FLUORAS 9	20,179 Ne 0 NEONAS 10	2
			26,98154 Al +3 ALIUMINIS 13	28,0855 Si −4 +2 +4 SILICIS 14	30,97376 P −3 +3 +5 FOSFORAS 15	32,06 S −2 +4 +6 SIERA 16	35,453 Cl −1 +1 +3 +5 +7 CHLORAS 17	39,948 Ar 0 ARGONAS 18	3
58,69 Ni +2 +3 NIKELIS 28	63,546 Cu +1 +2 VARIS 29	65,39 Zn +2 CINKAS 30	69,72 Ga +3 GALIS 31	72,59 Ge +2 +4 GERMANIS 32	74,9216 As −3 +3 +5 ARSENAS 33	78,96 Se +4 +6 SELENAS 34	79,904 Br −1 +1 +5 BROMAS 35	83,80 Kr 0 +2 KRIPTONAS 36	4
106,42 Pd +2 +4 PALADIS 46	107,868 Ag +1 SIDABRAS 47	112,41 Cd +2 KADMIS 47	114,82 In +3 INDIS 49	118,71 Sn +2 +4 ALAVAS 50	121,75 Sb −3 +3 +5 STIBIS 51	127,60 Te −2 +4 +6 TELŪRAS 52	126,905 I −1 +1 +5 +7 JODAS 53	131,29 Xe 0 +2 +4 +6 KSENONAS 54	5
195,08 Pt +2 +4 PLATINA 78	196,967 Au +1 +3 AUKSAS 79	200,59 Hg +1 +2 GYVSIDABRIS 80	204,383 Tl +1 +3 TALIS 81	207,2 Pb +2 +4 ŠVINAS 82	208,980 Bi +3 +5 BISMUTAS 83	(209) Po +2 +4 POLONIS 84	(210) At ASTATAS 85	(222) Rn 0 RADONAS 86	6
(281) Ds ARMŠTATIS 110	(272) 111	(285) 112		(289) 114		(292) 116		(293) 118	7

MASĖS SKLIAUSTELIUOSE – BENDRA PATVARIŲ IZOTOPŲ MASĖ

151,96 Eu +2 +3 EUROPIS 63	157,25 Gd +3 GADOLINIS 64	158,925 Tb +3 TERBIS 65	162,50 Dy +3 DISPROZIS 66	164,930 Ho +3 HOLMIS 67	167,26 Er +3 ERBIS 68	168,934 Tm +3 TULIS 69	173,04 Yb +2 +3 ITERBIS 70	174,967 Lu +3 LIUTECIS 71
(243) Am +3 +4 +5 +6 AMERICIS 95	(247) Cm +3 KIURIS 96	(247) Bk +3 +4 BERKLIS 97	(251) Cf +3 KALIFORNIS 98	(252) Es EINŠTEINIS 99	(257) Fm FERMIS 100	(258) Md MENDELEVIS 101	(259) No NOBELIS 102	(262) Lr LORENSIS 103

Naudota literatūra

1. *Ažusienis A.* Tarpžvaigždinės medžiagos fizika. – V.: Mokslas, 1989.
2. *Dobson K., Grace D., Lovett D.* Fizika XI–XII klasei, 1, 2 d. – V.: Alma littera, 2001–2002.
3. *Dorofejeva V., Dorofejevas V.* Ilgas kelias viršūnėn. – V.: Mokslas, 1986.
4. *Elektra* ir atomo sandara. – V.: Mintis, 1971.
5. *Felsager B., Jakobsen K., Schomacker G., Vedelsby M.* Tikslieji mokslai humanitarams I dalis. – V.: TEV, 1998.
6. *Foeger H.* Mėnulio metai 2001–2010 metai. – K.: Tyrai, 2000.
7. *Gineitytė V.* ir kt. Kas domina fizikus šiandien? – K.: Šviesa, 1996.
8. *Juzas D.* Neutrono istorija. – V.: Mintis, 1966.
9. *Kabardinas O.* Fizika. Informacinė medžiaga. – K.: Šviesa, 1988.
10. *Karazija R.* Fizika humanitarams I, II d. – V.: TEV, 1996.
11. *Karazija R.* Neregimųjų spindulių pėdsakai. – V.: Mokslas, 1983.
12. *Karcevas V.* Didžiųjų lygčių nuotykiai. – V.: Mokslas, 1983.
13. *Kikoinas I., Kikoinas A.* Fizika 9. – K.: Šviesa, 1991.
14. *Kitaigorodskis A.* Fizika mano profesija. – V.: Mintis, 1973.
15. *Klimka L.* Senolių kalendorius. – K.: Šviesa, 1996.
16. *Konstantinavičius K.* Gyvybės fizika arba nuo atomo iki ląstelės. – V.: Mokslas, 1978.
17. *Maronas V., Gorodeckis D.* Fizikos dėsniai, formulės, uždaviniai. – Minskas: Vyšeiskaja škola, 1986.
18. *Masiokas S.* Elektrotechnika. – V.: Mokslas, 1989.
19. *Merionas Dž. B.* Fizika ir fizinis pasaulis I, II d. – V.: Mokslas, 1981.
20. *Miakiševas G., Buchovcevas B.* Fizika 11. – K.: Šviesa, 1992.
21. *Miakiševas G., Buchovcevas B.* Fizika 12. – K.: Šviesa, 1993.
22. Pažinimo džiaugsmas. Mokslas ir visata. – V.: Vyriausioji enciklopedijų redakcija, 1990.
23. *Ponomariovas L.* Anapus kvanto. – V.: Mokslas, 1977.
24. *Portapas V.* Įdomioji meteorologija. – V.: Mokslas, 1990.
25. *Ramanauskas Z.* Fizikos vadovėlio naudojimas IX klasėje. – V.: PMTI, 1985.
26. *Straižys V.* Astronomija. – K.: Šviesa, 1993.
27. *Sviderskienė Z.* Visata ir mes. – V.: Mokslas, 1982.
28. *Šelestas V.* Skeveldros. – V.: Mokslas, 1987.
29. *Tarasonis V.* Fizika I, II, III d. – V.: Žiburio leidykla, 1998.
30. *Volkovas A.* Ieškant tiesos. – V.: Vyturys, 1987.
31. *Voroncovas-Veljaminovas B.* Astronomija. – K.: Šviesa, 1989.
31. *Prochorov A. M.* Fizičeskij enciklopedičeskij slovar. – Moskva: Sovetskaja enciklopedija, 1984.
32. *Bien A.* Poza ziemią. – Warszawa: Iskry, 1979.

Iliustracijų šaltiniai

1. *Tarasonis V.* Fizika III d. Vadovėlis XII klasei. V., 1998 (144 pav., 238 pav., 249 pav.)
2. Interneto puslapiai
   http://stargazers.gsfc.nasa.gov/epo/images/geospace_images/magnetism/magnet_field.jpg
   http://www.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/icons/solarexp.jpg

Vanda Palubinskienė
FIZIKA
Vadovėlis XI–XII klasei
Suaugusiųjų ir savarankiškam mokymuisi
Pirmoji knyga

Dailininkas *Elvis Zovė*
Redaktorė *Elvyra Žurauskienė*
Viršelis *Rūtos Deltuvaitės*

Tir. 2000 egz. Leid. Nr. 15 660. Užsak. Nr. 5.612.
Uždaroji akcinė bendrovė leidykla „Šviesa“,
Vytauto pr. 25, LT-44352 Kaunas.
El. p. mail@sviesa.lt
Interneto puslapis http://www.sviesa.lt
Spausdino AB spaustuvė „Spindulys“,
Gedimino g. 10, LT-44318 Kaunas.
El. p. spaustuve@spindulys.lt
Interneto puslapis http://www.spindulys.lt
Sutartinė kaina

Nors vadovėlis skiriamas suaugusiųjų ir savarankiškam mokymuisi, jame pateikiama medžiaga pilnai atitinka bendrojo lavinimo vidurinės mokyklos fizikos programą.

Vadovėlis išleistas dviem knygomis. Šioje, pirmojoje, knygoje gilinamasi į seniausiai žinomą fizikos sritį – mechaniką, analizuojami šiluminiai reiškiniai, dėstomos elektrostatikos, elektromagnetizmo teorijos, aiškinama nuolatinės elektros srovės esmė, jos savybės.

Medžiaga dėstoma taip, kad būtų galima mokytis ir neakivaizdiniu būdu. Po kiekvienos temos pateikiami praktiniai klausimai ir užduotys, kurių atsakymai yra knygos gale. Čia yra ir įvairių priedų: pagrindinės sąvokos, konstantos ir jų išvestiniai dydžiai, fizikinių dydžių lentelės.

Leidinys pravers ir kitose mokymosi įstaigose besimokantiems, galės būti papildoma mokomoji knyga visiems, kurie rengiasi fizikos egzaminui.

ISBN 5-430-04042-8

